



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TE 141599

ANALISA HARMONISA DAN RANCANG FILTER SINGLE TUNED PADA SISTEM KELISTRIKAN BANDARA INTERNASIONAL JUANDA SURABAYA

M. Aris Maulana Rifa'i

2213 105 092

Dosen Pembimbing

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**HARMONICS ANALYSIS AND DESIGN OF SINGLE
TUNED FILTER ON ELECTRICAL SYSTEMS
INTERNATIONAL JUANDA SURABAYA AIRPORT**

M. Aris Maulana Rifai

NRP 2213105092

Supervisors

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Faculty Of Industry Technology

Sepuluh Nopember Institute Of Technology

Surabaya 2016

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**ANALISA HARMONISA DAN RANCANG *FILTER SINGLE TUNED* PADA SISTEM KELISTRIKAN BANDARA INTERNASIONAL JUANDA SURABAYA**” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 14 Juni 2016

M. Aris Maulana Rifai
NRP. 2213105092

**ANALISA HARMONISA DAN RANCANG FILTER
SINGLE TUNED PADA SISTIM KELISTRIKAN
BANDARA INTERNASIONAL JUANDA SURABAYA**

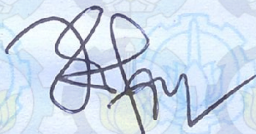
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



**Dr. Ardyono P. ST. M. Eng
NIP. 197309271998031004**

Dosen Pembimbing II



**Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT
NIP. 196603181990101001**

**Surabaya
Juni, 2016**

KATA PENGANTAR

Dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT, atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

Analisa Harmonisa dan Rancang Filter *Single Tuned* Pada Sistem Kelistrikan Bandara Internasional Juanda Surabaya

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada program Sarjana ITS Jurusan Teknik Elektro. Tugas Akhir ini dikerjakan atas dasar ilmu yang penulis dapatkan dan pelajari selama perkuliahan, bimbingan dari pembimbing Tugas Akhir, Bapak/Ibu dosen pengajar serta seluruh pihak yang turut membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Apa yang penulis kerjakan dalam Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis berharap dimasa yang akan datang dapat mengalami penyempurnaan. Insyaallah penulis juga akan menerima dengan lapang dada segala saran dan kritik serta masukan yang membangun. Harapan penulis dalam pengantar ini semoga buku Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Mei 2016

Penyusun

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya Tugas Akhir ini, perkenankanlah penyusun mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-NYA.
2. Ayahanda Imam Khayatudin dan Ibunda Maskurun di Nganjuk yang sangat ku cintai, dan selalu memberi dukungan dan do'a.
3. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. sebagai dosen pembimbing saya yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT sebagai dosen pembimbing saya yang telah memberikan kesempatan, arahan dan perhatiannya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Untuk adik saya, Yuswan, Lina, Ilmawan dan Putri, makasih banyak buat dukungan dan doanya.
6. Untuk istri saya Nanda Sulistiyana Andrian yang selalu memberi dukungan dan perhatian.
7. Untuk temen-temen seperjuangan TA, Herman F, Nyoman R., Adi. makasih banyak,
8. Seluruh Dosen, Karyawan dan Staf Pegawai di Jurusan Teknik Elektro - FTI ITS yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Akhir kata, segala kritik dan saran sangat saya harapkan untuk pengembangan selanjutnya.

Surabaya, Mei 2016

Penyusun

DAFTAR ISI

JUDUL	i
TITLE	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	3
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Tugas Akhir	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Metodologi	5
a Study Literatur	5
b Pengambilan Data	5
c Simulasi dan Analisa	5
d Penarikan Kesimpulan	6
1.6. Sistematika	7
1.7. Relevansi	7
 BAB II DASAR TEORI	
2.1. Harmonisa.....	11
2.2. Total Harmonic Distortion (THD)	13
2.3. Standar Batasan Harmonisa Pada Sistem Distribusi	14
2.4. Filter Harmonisa	18
2.5. Filter Harmonisa Pasif	19
2.5. 1. Komponen Filter	21
a Kapasitor	21
b Induktor.....	21
2.5. 2. Single Tuned Filter	22
2.5. 3. High Pass Damped Filter	23
2.6. Perancangan Filter Harmonisa Pasif	25

BAB III SISTEM TENAGA LISTRIK BANDARA INTERNASIONAL JUANDA SURABAYA

3.1.	Bandara Internasional Juanda Surabaya	31
3.2.	Kategori Beban	32
3.2. 1.	Kategori Satu Atau Jaringan Prioritas.....	33
3.2. 2.	Peralatan Prioritas Umum	33
3.2. 3.	Kategori Dua atau jaringan Geneeral.....	34
3.3.	Sistem Distribusi Listrik Bandara Juanda.....	34
3.4.	Beban Pada Sistem Bandara Juanda	35
3.4. 1.	Kontinyuitas Pelayanan	36
3.4. 2.	Kualitas Daya.....	36
3.4. 3.	Perluasan Dan Penyebaran.....	36
3.4. 4.	Pengembangan Sistem yang Fleksibel.....	36
3.4. 5.	Kondisi dan Situasi Lingkungan	37
3.4. 6.	Ekonomis	37
3.5.	Kegiatan Pengukuran Listrik Bandara	37
3.6.	Data Pengukuran Listrik Bandara	40
3.6. 1.	Bus POL (PT Pertamina 0,38kV)	40
3.6. 2.	Bus 17 (PT Pertamina 20 kV)	41
3.6. 3.	Bus Panel PTB 20kV	42
3.6. 4.	Bus MPH 11 (6,6kV)	42
3.6. 5.	Bus OB	43
3.6. 6.	Bus MPH3 20kV.....	44
3.6. 7.	Bus PTB3 (0,38 kV)	45
3.6. 8.	Bus PTB (0,38kV)	46

BAB IV ANALISA HARMONISA DAN PERENCANAAN FILTER PEREDAM HARMONISA

4.1.	Simulasi Data Pada ETAP	49
4.2.	Hasil dan Analisa.....	57
4.3.	Rancang Filter RCL.....	58
4.4.	Hasil Pemasangan Filter	71

BAB V PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	73
5.2.	Saran.....	73

DAFTAR PUSTAKA..... 75

BIODATA PENULIS 77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Flow chart</i> penyelesaian tugas akhir.....	6
Gambar 2.1 Gelombang fundamental dan terdistorsi	12
Gambar 2.2 Filter harmonisa <i>single tuned</i>	22
Gambar 2.3. Filter harmonisa <i>high pass dampedorde</i> dua.....	24
Gambar 2.4 Pemasangan filter harmonisa pasif pada sistem	26
Gambar 2.5 Permodelan impedansi sistem dengan impedansi filter	27
Gambar 3.1 Single line diagram Bandara Juanda	31
Gambar 3.2 a. Peralatan yang digunakan dalam pengukuran	38
Gambar 3.2 b. Kegiatan pengukuran di bus 17 menggunakan FLUKE-434	38
Gambar 3.3 Single line diagram sistem tenaga listrik juanda dan Load Flow	39
Gambar 3.4 Display FLUKE-434 saat pengukuran harmonisa arus dengan nilai THD _i 30,5%	40
Gambar 4.1 Menu Harmonic Library ETAB 12.6.0	50
Gambar 4.2 Harmonic Library Editor di ETAB 12.6.0	51
Gambar 4.3 <i>Harmonic Library Editor</i> di ETAP 12.6.0	52
Gambar 4.4 Simulasi harmonisa dengan tool VSD dan UPS di di ETAP 12.6.0	53
Gambar 4.5 <i>Tab rating</i> pada <i>property</i> UPS di bus POL	54
Gambar 4.6 <i>Tab harmonic</i> pada <i>property</i> UPS bus POL	55
Gambar 4.7 <i>Tab harmonic</i> pada <i>property</i> VFD bus PTB3	55
Gambar 4.8 <i>Tab harmonic</i> pada <i>property</i> VFD bus PTB3 di terminal penumpang	56
Gambar 4.9 <i>Tab rating</i> pada <i>property</i> VSD bus PTB	56
Gambar 4.10. <i>Tab harmonic</i> pada <i>property</i> VFD bus PTB di terminal penumpang	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Standar batas tegangan harmonisa menurut IEEE.....	14
Tabel 2.2. Standar batas arus harmonisa menurut IEEE.....	14
Tabel 2.3 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas A	15
Tabel 2.4 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas B.....	16
Tabel 2.5 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas C.....	16
Tabel 2.6 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D[10].....	17
Tabel 2.7 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D[11].....	17
Tabel 3.1 Data beban Bandara Juanda Essential dan General.....	32
Tabel 3.2 Data kapasitas transformator sistem Bandara Juanda.....	34
Tabel 3.3 Data ukur lapangan pada bus POL (PT. Pertamina0,38kV)	40
Tabel 3.4 Data ukur lapangan pada bus 17 (PT. Pertamina 20kV)....	41
Tabel 3.5 Data ukur lapangan pada bus panel PTB (20kV)	42
Tabel 3.6 Data ukur lapangan pada bus panel MPH11(6,6kV)	43
Tabel 3.7 Data ukur lapangan pada bus OB	44
Tabel 3.8 Data ukur lapangan pada bus MPH 20kV	44
Tabel 3.9 Data ukur lapangan pada bus PTB3(0,38kV).....	45
Tabel 3.10 Data ukur lapangan pada bus PTB (0,38kV).....	46
Tabel 4.1 Data penurunan nilai %THDv di beberapa bus	57
Table 4.2 Setting filter di HF3, PTB 5th, dan HF4.....	71
Table 4.3 Setting filter di HF6, 5th, dan PTB 7th.....	71
Table 4.4 Penurunan nilai harmonisa setelah pemasangan filter.....	72

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bandara Juanda merupakan bandara internasional yang melayani penerbangan domestik dan internasional, dimana memiliki pasokan daya dari PLN dan Generator back up yang dapat dipakai ketika terjadi masalah pasokan listrik dan membackup hal-hal yang vital. Dalam perjalanannya ditemui beberapa hal yang salah satunya pada bus pol yaitu gagalnya pengaman relay proteksi *voltage fault*, kerusakan pada modul kontrol motor, kerusakan modul PLC pada pemindah otomatis breker PLN ke genset, dan kerusakan beberapa elektronik lain yang salahsatunya efek dari dampak yang ditimbulkan harmonisa.

Sampai saat ini pada sistem kelistrikan bandara juanda belum pernah dilakukan pengukuran besaran harmonisa dan belum ada yang mengkaji lebih mengenai filter penurun harmonisa. Apalagi setelah dilakukan pengukuran di beberapa bus terdapat nilai harmonisa yang cukup tinggi, maka dirasa perlu untuk mengkaji dan merekomendasikan penggunaan sebuah filter yang dapat mengurangi efek yang ditimbulkan akibat harmonisa dan sebagai masukan untuk sistem kelistrikan juanda yang dapat diaplikasikan secara real.

Banyaknya alternatif yang dapat diaplikasikan dalam mengurangi nilai harmonisa, akan tetapi perlu adanya pengkajian khusus untuk mendapatkan alternatif terbaik sehingga didapat penghematan dalam investasi filter dan penurunan nilai harmonisa yang signifikan.

Secara konvensional untuk memfilter harmonisa pada bus dilakukan dengan filter pasif karena harganya lebih murah. Filter pasif terdiri dari sebuah bank filter LC yang digunakan untuk menekan harmonisa. Akan tetapi sebuah link filter pasif hanya dapat memfilter satu frekwensi harmonisa, sehingga dibutuhkan n link filter pasif untuk minimalis sejumlah n harmonisa. Pada pemakaian filter pasif karena hanya dapat memfilter satu frekwensi harmonisa, sehingga pemasangannya dipilih frekwensi yang nilai harmonisanya tinggi.

Alternatif lain untuk filter harmonisa adalah menggunakan filter RCL. Filter RCL dapat digunakan pada sumber tegangan baik satu fasa maupun tiga fasa. Filter RCL merupakan filter yang terdiri dari komponen pasif berupa sebuah induktor, sebuah reistor, dan sebuah

kapasitor. Filter RCL lebih efektif bila dibandingkan filter L biasa, hal ini disebabkan karena induktor digunakan lebih kecil untuk harmonisa

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dari hasil pengukuran didapat nilai harmonisa yang didapat di beberapa bus tinggi.
2. Harmonisa memberikan dampak signifikan terhadap *endurance* peralatan.
3. Terdapat beberapa masalah seperti kerusakan modul kontrol motor, kegagalan rele proteksi, dan kerusakan PLC yang salah satu faktor penyebabnya adalah harmonisa yang tinggi.

1.3 Tujuan

Tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah :

1. Mencari sumber harmonik dominan dengan melakukan pengukuran.
2. Mendapatkan besaran harmonik dominan dari beberapa bus bus.
3. Merancang filter harmonik pada bus dominan.
4. Merancang filter harmonik yang tepat sehingga beberapa dampak dari harmonisa dapat diturunkan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun permasalahan dan batasan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir kali ini adalah:

1. Melakukan pengukuran pada beberapa bus dengan tujuan mencari nilai harmonisa yang tinggi.
2. Melakukan analisa sistem kelistrikan di bandara Juanda Surabaya dengan menggunakan *software* ETAP..
3. Melakukan perancangan filter yang sesuai dengan situasi plant dan mensimulasikan filter di *software* ETAP.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

a. Studi Literatur

Mengumpulkan buku dan referensi mengenai analisa sistem tenaga yang khusus membahas Analisis Sistem Tenaga yang khusus membahas harmonisa, dampak yang ditimbulkan harmonisa, dan perancangan filter.

b. Pengambilan Data

Beberapa data dibutuhkan untuk proses analisa yang diantaranya didapat dari pengukuran bus yang diperkirakan memiliki nilai harmonisa tinggi, single line diagram, data beban (P, Q), dan impedansi saluran pada tiap distribusi. Semua data diinputkan dalam program *power flow* menggunakan *software* ETAP.

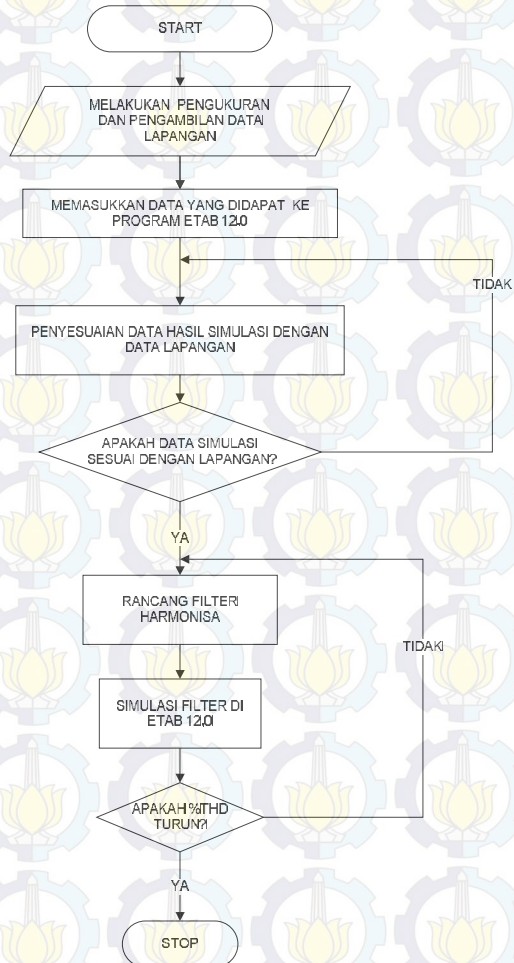
c. Simulasi dan Analisis Data

Langkah awal tahap simulasi adalah menentukan aliran daya disetiap line distribusi dengan dasar single line diagram dan survei lapangan. Data harmonisa yang diambil dari pengukuran digunakan sebagai penentuan input data bus pada program simulasi ETAP sehingga didapat hasil simulasi ETAP yang sama dengan data lapangan. Pada tahapan ini penting karena membantu proses analisa dan penentuan penempatan dan disain filter yang paling sesuai.

Dalam perancangan dan desain filter ada beberapa kriteria yang harus dipenuhi. Secara konvensional untuk memfilter harmonisa pada penyerah dilakukan dengan filter pasif karena harganya lebih murah. Filter pasif terdiri dari sebuah bank filter LC yang digunakan untuk menekan harmonisa. Akan tetapi sebuah link filter pasif hanya dapat memfilter satu frekwensi harmonisa, sehingga dibutuhkan beberapa n link filter pasif untuk meminimalis sejumlah n harmonisa. Alternatif lain untuk filter harmonisa adalah emnggunakan filter RCL. Filter RCL dapat digunakan pada sumber tegangan baik satu fasa maupun tiga fasa. Filter RCL merupakan filter yang terdiri dari komponen pasif berupa sebuah induktor, sebuah resistor dan sebuah kapasitor.

d. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil analisa data dan perbandingan metode yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yang merupakan jawaban dari permasalahan.



Gambar 1.1 *Flow chart* penyelesaian tugas akhir

1.6 Sistematika

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Harmonisa dan Filter penurun harmonisa.

Bab ini membahas harmonisa dan dampak dari harmonisa serta mengenalkan jenis-jenis filter penurun harmonisa.

Bab 3 : Sistim kelistrikan bandara internasional juanda surabaya plant.

Bab 4 : Analisa harmonisa dan perancangan filter RCL peredam harmonisa.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi referensi ataupun dapat menjadi tugas akhir selanjutnya bagi mahasiswa lain yang akan melakukan penelitian yang berhubungan dengan analisis yang dilakukan penulis.
2. Dapat menjadi dasar pertimbangan bagi PT.Angkasapura atau pihak pengembang sistem distribusi Bandara untuk mengetahui kondisi real sistem yang telah ada, dan dapat digunakan untuk tujuan monitoring data pada sistem.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Harmonisa

Sistem tenaga listrik normalnya berkerja pada frekuensi fundamentalnya, contohnya di Indonesia menggunakan 50 Hz. Apabila sistem tenaga listrik memenuhi tepat pada frekuensi tersebut, maka kualitas dari sistem kelistrikannya sangat baik dan terhindar dari kerusakan peralatan-peralatan. Akan tetapi sangat sulit menemukan sistem tenaga listrik yang hanya memiliki frekuensi tepat di 50 Hz, dikarenakan adanya gangguan-gangguan yang diakibatkan penggunaan beban nonlinier, sehingga sistem tersebut terdapat harmonisa dan memiliki beberapa frekwensi kelipatan dari frekwensi fundamentalnya .

Harmonisa dapat didefinisikan sebagai distorsi priodik dari gelombang sinus tegangan, arus, atau daya dengan bentuk gelombang dan frekwensinya merupakan kelipatan diluar bilangan satu terhadap frekwensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Nilai frekuensi dari gelombang harmonisa yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamentalnya dengan bilangan harmonisa (f , $2f$, $3f$, dst) bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa (h_1 , h_2 , h_3 , dst) pada frekuensi kelipatan. Semakin banyak gelombang harmonisa yang diikutsertakan pada gelombang fundemantalnya, maka gelombang akan semakin mendekati gelombang persegi atau gelombang akan berbentuk non sinusoidal.

Salah satu penyebab harmonisa adalah beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artianya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Beban linier ini tidak memberikan dampak yang buruk terhadap perubahan arus maupun tegangan, contoh beban linier adalah resistor (R). Beban non linier adalah beban dengan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masuknya (mengalami distorsi). Gangguan yang diakibatkan distorsi gelombang arus dan tegangan disebut dengan harmonik.

Saat ini elektronika daya sebagai konverter banyak digunakan dalam sistem penyerah atau inverter untuk penyedia energi listrik sesuai kebutuhan. Menurut IEEE 519-1992 yaitu standar internasional harmonisa mengidentifikasi sumber utama dari harmonisa pada sistem tenaga adalah converter daya, busur peleburan, static VAR kompensator, inverter, kendali fasa elektronika daya, cycloconverters, power supply DC dan PWM. Beban tidak linier umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor.

Berikut ini adalah gambar gelombang fundamental dan gelombang yang terkena dampak gangguan harmonisa.



Gambar 2.1 Gelombang fundamental dan terdistorsi

Akibat yang ditimbulkan pada peralatan jika terdapat arus atau tegangan harmonisa antara lain:

- Rusaknya peralatan listrik
- Terbakarnya kabel / konduktor penghantar
- Pada transformator daya menurun, bertambah *losses*
- Pada motor listrik terjadi *overheat*
- Pada alat ukur kWh meter elektromagnetis terjadi kesalahan pengukuran
- Kegagalan fungsi relay pengaman.

2.2. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan nilai prosentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamentalnya. Semakin besar prosentase THD ini menyebabkan semakin besarnya resiko kerusakan peralatan yang diakibatkan harmonisa arus maupun tegangan. Nilai THD yang diijinkan secara internasional maksimal berkisar 5 % dari tegangan dan arus frekwensi fudamentalnya.

Harmonisa yang terjadi pada sistem tenaga listrik pada setiap orde memiliki besaran yang disebut IHD (*Individual Harmonic Distortion*). Dimaksudkan IHD orde ke 5 dari frekuensi fundamental 50 Hz adalah (50 Hz x 5), sehingga frekuensi harmonisa yang terjadi di orde lima adalah 250 Hz. Harmonisa masing masing orde akan diakumulasikan dengan suatu rumusan dari total IHD dapat disebut *Total Harmonic Distortion*(THD). THD juga dapat diartikan sebagai prosentase dari beberapa orde harmonisa/faktor distorsi. THD dapat dibedakan menjadi 2 yaitu THD_v untuk tegangan harmonisa sedangkan THD_i untuk arus harmonisa.

Untuk rumus THD_v dan THD_i sebagai berikut:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_h^N (V_h^2)}}{V_s} \quad (2.1)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_h^N (I_h^2)}}{I_s} \quad (2.2)$$

Keterangan:

V_h = Tegangan harmonisa orde ke-h.

V_s = Tegangan fundamental dari sistem.

I_h = Arus harmonisa orde ke-h.

I_s = Arus fundamental sistem.

THD akan ada pada setiap bus atau node. THD_v yang dihasilkan tergantung pada beban dan impedansi saluran yang ada pada sistem distribusi. Terdapat beberapa peralatan yang dapat dipakai untuk pengukuran THD dan IHD antara lain Oscilloscope, Fluke, dan

Spektrum Analyzer. Oscilloscope memantau adanya arus maupun tegangan harmonisa secara menyamping, sedangkan Spektrum Analyzer memantau arus maupun tegangan harmonisa dari depan sehingga gelombang dengan frekuensi yang lebih tinggi dari gelombang fundamental bisa dipantau. Standar mengenai harmonia pada bus atau node harus ditaati atau dipenuhi demi keamanan, standar tersebut mengenai limit/batas injeksi harmonisa ke bus atau node pada sistem distribusi. Hal tersebut akan dibahas pada subbab berikutnya.

2.3. Standar Batasan Harmonisa pada Sistem Distribusi.

Secara umum pengaruh harmonisa pada penggunaan beban non linier dibatasi. Ada beberapa lembaga standar yang memberikan batasan maksimal THD maupun IHD pada sistem tenaga yang salah satunya telah diatur dalam IEEE Std. 519-1992. Berikut ini tabel mengenai standar harmonisa tegangan pada jaringan distribusi 120 Volt sampai 69 kV pada tabel 2.1.a dan standar untuk harmonisa arus ditunjukkan pada tabel 2.1.b.

Tabel 2.1. Standar batas tegangan harmonisa menurut IEEE

Tegangan Bus	IHD (%)	THD(%)
Dibawah 69 kV	3,0	5,0
69.001 kV sampai 161kV	1,5	2,5
Diatas 161.001kV	1,0	1,5

Tabel 2.2. Standar batas arus harmonisa menurut IEEE

I_{sc}/I_L	Harmonik preorde (%)					THD
	<11	11<h≤17	11<h≤17	11<h≤17	35>35	
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Dimana : I_{sc} = Arus *Short Circuit* maksimum

I_L = Arus beban maksimum pada dasar frekuensi di bus.

Karena belum adanya standard baku yang dikeluarkan oleh IEEE yang mengatur batasan harmonisa pada beban kecil satu fasa ataupun tiga fasa maka IEC (*International Electrotechnical Commision*) mengeluarkan standard maksimal nilai harmonisa untuk beban satu dan tiga fasa dan di tuangkan dalam standard IEC 61000-3-2. Pada standard IEC 61000-3-2, bebean kecil tersebut diklasifikasikan dalam kelas A, B, C, dan D. Dimana masing-masing kelas mempunyai batasan harmonisa yang berbeda-beda yang dijelaskan sebagai berikut:

a. Kelas A

Kelas ini merupakan semua kategori beban termasuk didalamnya peralatan penggerak motor dan peralatan tiga fasa yang arusnya tidak lebih dari 16 amper perfasanya. Semua peralatan yang tidak termasuk dalam tiga kelas yang lain dimasukkan dalam kategori kelas A. Batasan harmonisanya hanya didefinisikan untuk peralatan satu fasa (tegangan kerja 230V) dan tiga fasa (400V) dimana batasan arus harmonisanya seperti terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2.3 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas A

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksim (A)
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
Ganjil ($13 < n < 41$)	$2,25/n$
2	1,08
4	0,43
6	0,30
Genap ($13 < n < 41$)	$1,84/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

b. Kelas B

Kelas ini meliputi semua peralatan *portable* yang batasan arus harmonisanya merupakan harga absolut maksimum dengan waktu kerja yang singkat. Batasan arus harmonisanya diperlihatkan pada tabel 2.2

Tabel 2.4 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas B

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksim (A)
3	3,45
5	1,71
7	1,155
9	0,60
11	0,495
13	0,315
Ganjil ($13 < n < 41$)	$3,375/n$
2	1,62
4	0,645
6	0,45
Genap ($13 < n < 41$)	$2,76/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

c. Kelas C

Kelas C termasuk didalamnya semua peralatan penerangan dengan daya input aktifnya lebih besar dari 25 Watt. Batasan arus diekspresikan dalam bentuk prosentase arus fundamental. Prosentase arus maksimum yang diperbolehkan untuk masing-masing harmonisa diperlihatkan tabel 2.3

Tabel 2.5 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas C

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksim (A)
2	2
3	$30 \times \text{PF rangkaian}$
5	10
7	7
9	5
Ganjil ($13 < n < 41$)	3

Sumber : IEC 61000-3-2

d. Kelas D

Termasuk semua jenis peralatan yang dayanya dibawah 600 Watt khususnya yaitu:

1. PC (Personal Computer)
2. Monitor
3. TV

Batasan arusnya diekspresikan dalam bentuk mA/W dan dibatasi pada harga absolut yang nilainya diperlihatkan tabel 2.4

Tabel 2.6 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D [10]

Harmonisa Ke-n	Arus harmonisa Maksimim (mA/W) $75 < P < 600$ W	Arus harmonisa Maksimim (mA/W) $P > 600$ W
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
Ganjil ($13 < n < 41$)	$3,85/n$	$2,25/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

Seperti diketahui bahwa hampir semua peralatan elektronik bekerja dengan sumber arus searah sehingga dalam oprasinya dibutuhkan p eralatan penyearah dan dihubungkan langsung ke sumber tegangan bolak-balik.

Untuk penyearah terdistorsi gelombang yang arusnya cukup tinggi dan banyak dipakai secara bersamaan, dimasukkan dalam kategori kelas D. Sementara untuk penyearah dengan arus yang terdistorsi dapat dimasukkan ke dalam kategori kelas A.

Tabel 2.5 batasan arus harmonisa untuk kelas A, kelas D, dan penyearah dengan daya 100 Watt

Tabel 2.7 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D [11]

Harmonisa Ke-n	Arus harmonisa Maksimim (mA/W) $75 < P < 600$ W	Arus harmonisa Maksimim (mA/W) $P > 600$ W	Batas kelas D (input 100W)-A
3	2,30	3,4	0,34
5	1,14	1,9	0,19
7	0,77	1,0	0,10

9	0,40	0,5	0,05
11	0,33	0,35	0,035
$(11 < n < 41)$	$0,15 \times 0,15/n$	$3,85/n$	$0,386/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

Harmonisa pada sistem distribusi apabila melebihi batas tersebut maka tingkat utilitas dari sistem itu kurang baik atau tingkat pelayanan dayanya relatif kurang maksimal.

2.4. Filter Harmonisa

Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitudo suatu frekuensi dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi dundamental dapat mengkompensasi daya raktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Banyak sekali cara yang digunakan untuk memperbaiki sistem, khususnya meredam harmonisa. Secara garis besar ada beberapa cara untuk meredam harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linier diantaranya:

- Penggunaan filter pada tempat yang tepat, terutama pada daerah yang dekat dengan sumber pembangkit harmonisa sehingga arus harmonisa terjerat disumber dan mengurangi penyebaran arusnya.
- Perngunaan filter aktif
- Kombinasi filter aktif
- Konverter dengan reaktor antara fasa, dan lain-lain.

Disamping sistem diatas dapat bertindak sebagai peredam harmonisa, tetapi dapat juga memperbaiki faktor daya yang rendah pada sistem. Jika perbaikan faktor daya langsung dipasang kapasitor terhadap sistem yang mengandung harmonisa, maka akan menyebabkan amplitudo pada harmonisa tertentu membesar.

2.5. Filter Harmonisa Pasif

Filter pasif dipasang pada sistem dengan tujuan untuk meredam harmonisa dan tujuan lain yaitu untuk memperbaiki faktor daya, berupa komponen L dan C yang dapat ditala untuk satu atau dua frekuensi. Filter dengan penalaan tunggal ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah).

Dalam beberapa kasus, reaktor sejati tidak akan mampu mengurangi distorsi harmonisa arus ke tingkat yang diinginkan. Dalam kasus ini sangat diperlukan filter yang lebih baik.

Filter pasif terdiri dari kapasitor, induktor dan resistor seperti pada Gambar 2.5 yang ditala pada frekuensi harmonisa tunggal dan mempunyai impedansi yang sangat rendah. Jika filter harmonisa *dituning* sebagai teknik peredaman harmonisa, maka perlu memberikan filter ganda untuk memenuhi batas distorsi yang ditentukan. Saat filter harmonisa jenis shunt dihubungkan dengan sistem daya, mereka akan menyebabkan pergeseran frekuensi resonansi alami pada sistem tenaga.

Redaman Q filter, biasanya dalam wilayah 0,5 sampai 5, yang memiliki impedansi rendah berbagai frekuensi. Ketika digunakan untuk menghilangkan orde harmonisa lebih tinggi (misalnya 17 keatas) itu juga disebut sebagai high-pass filter. Contoh yang khas dari tinggi rendahnya Q rangkaian filter dan impedansi rangkaian fariasi frekuensi akan tergambar dalam gambar 2.5 dan 2.6.

Dalam kasus tuned Q didefinisikan sebagai rasio dari induktansi atau kapasitansi untuk resistansi di frekuensi resonansi, yaitu

$$Q = \frac{X_0}{R} \dots\dots\dots(2.1)$$

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 *filter pass band* (PB) dibatasi oleh frekuensi dimana filter reaktansi yang sama dengan reistensinya, yakni impesansi sudut 45 dan impedansi modul $\sqrt{2}R$. Kualitas faktor dan pass band yang terkait dengan persamaan.

$$Q = \frac{\omega_n}{PB} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana ω_n adalah pengatur sudut frekuensi di lingkaran setiap detik. Kejelasan dari pengaturan di high-pass filter adalah bolak balik dari tuned filters yakni $Q = \frac{R}{X}$.

Lebih dari filter detuning dari frekuensi nominal tuned diwakili dengan faktor δ . Faktor ini meliputi berbagai efek :

- i. Varisi di frekuensi dasar
- ii. Variasi di kapasitor dan induktor filter menurut usia dan temperatur
- iii. Awal tuning sesuai toleransi pabrik dan ukuran terbatas dari setiap tuning.

Keseluruhan detuning, untuk setiap unit dari frekuensi adalah:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \dots\dots\dots(2.3)$$

selain itu, untuk perubahan dari L atau C sebesar 2% pada detuning yang sama akan merubah frekuensi system 1%, sehingga δ dapat dinyatakan dalam persamaan.

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_s} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Low past filter harmonik berfungsi sebagai penekan luas harminisa, menawarkan pendekatan unutm meredam harmonisa. Filter dituning untuk harmonisa tertentu, filter tersebut menyaring semua frekurnsi harminisa, termasuk harminisa ketiga. Filter tersebut terhubung secara seri dengan beban tidak linier dengan impedansi seri yang besar. Sebaliknya mereka dipasok kedrive melalui kapasitor filter. Untuk alasan ini, sangat mudah untuk memprediksi tingkatan distorsi yang akan dicapai dan untuk menjamin hasilnya. Sebuah low past filter dapat dengan mudah menawarkan tingkat harminisa arus rendah 8% sampai 12 %.

2.5.1. Komponen Filter

Dengan mengetahui dasar dan tegangan harmonisa yang sesuai dengan rating arus pada busbar dan rating tegangan pada kapasitor, induktor dan resistor dapat diperhitungkan dan dengan semua ini dapat diketahui daya aktif dan reaktifnya serta rugi-rugi nya.

Untuk mengantisipasi bahaya dari komponen- komponen tersebut sangat diperlukan rating pada saat kondisi-kondisi khusus. Ini berarti kita perlu memasukkan dasar tegangan tinggi dari defiasi frekuensi efektif, dan nilai harmonik arus dan sumber lain yang memungkinkan menimbulkan resonansi antara filter dan sitem.

a Kapasitor

Kapasitor merupakan bagian standard yang terhubung dalam rangkaian seri dan paralel untuk mencapai kebutuhan dari keseluruhan tegangan dan rating KVA. Faktor utama yang terlibat di suatu rancangan adalah koefisien temperatur dari kapasitor, besar daya reaktif perunit, rugi daya, keandalan dan biaya.

Koefisien temperatur dari kapasitor diharapkan agar tuned filter dapat dihindari detuning karena dengan perubahan kapasitas berdasarkan temperatur ruangan atau kapasitor self heating patut diperhitungkan. Ada kalanya ini tidak begitu penting untuk dampet filter atau kapasitor daya.

Kapasitor menghasilkan daya reaktif dengan losses yang kecil dan dapat dioperasikan pada tegangan stress yang tinggi. karena alasan ini, pengoperasian panjang pada over voltage yang tidak wajar harus dihindari untuk menghindari panas yang menghancurkan dielektrik pada tegangan tinggi ketika priode yang singkat akan menghasilkan kerusakan ionisasi dari sielektrik.

Syarat daya reaktif pada kapasitor adalah total dari daya reaktif dari tiap subyek yang berfrekuensi.

b Induktor

Induktor digunakan pada rangkaian filter untuk menangkap frekuensi tinggi, yaitu rugi-rugi *skin effect* dan histeris yang masuk dalam perhitungan rugi daya. *Level flux* pada lempeng besi juga harus diperhitungkan, yaitu detuning karena magnetisasi pada beban nonlinier.

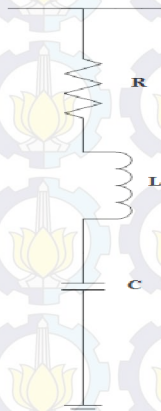
Ini akan menuntun pada penggunaan inti besi dengan kerapatan flux yang rendah. Hal lain adalah filter induktor lebih baik dirancang dengan inti yang tak bermagnet.

Q disebagaian besar frekuensi harmonisa dipilih pada level rendah dan sering bernilai antara 50 sampai dengan 150. Walaupun demikian, penurunan nilai Q adalah hal yang umum dan ini berasal dari penggunaan seri resistor.

Rating induktor sangat bergantung pada arus rms maksimum dan levelisolasi. Hal tersebut merupakan sarat untuk menahan sentakan switching. Umumnya R dan L yang dibumikan adalah tuned filter.

2.5.2. *Single tuned filter*

Filter harmonisa pasif *single tuned* menala atau peredamannya pada beberapa orde harmonisa, khususnya pada orde dengan frekuensi rendah antara 5th dan 7th. Filter ini kombinasi antara resistor, kapasitor dan induktor dipasang secara seri. Berikut ini gambar filter hamonisa pasif *single tuned*.



Gambar 2.2 Filter harmonisa *single tuned*

Filter harmonisa pasif *single tuned* akan membentuk rangkaian impedansi sebagai berikut:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.3)$$

Filter harmonisa pasif akan menyerap seluruhnya arus harmonisa pada orde tersebut pada sistem distribusi yaitu jika pada filter ini nilai dari reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif pada filter tersebut sama dengan nol. Hal tersebut disebut kondisi resonansi.

Pada filter harmonisa pasif *single tuned* ada faktor kualitas (Q) dari sebuah filter tersebut. Hal tersebut digunakan pada analisa frekuensi scan, dimana titik kecuraman dalam peredaman frekuensi harmonisa disuatu orde harmonisa. Faktor kualitas dapat diartikan sebagai perbandingan antara induktansi pada saat resonansi dengan besar dari resistansi yang ada pada filter tersebut. Biasanya pada filter ini nilai Qnya antara 30 sampai 60. Rumusannya sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (2.4)$$

dimana:

X_L = Induktansi

R = Resistansi

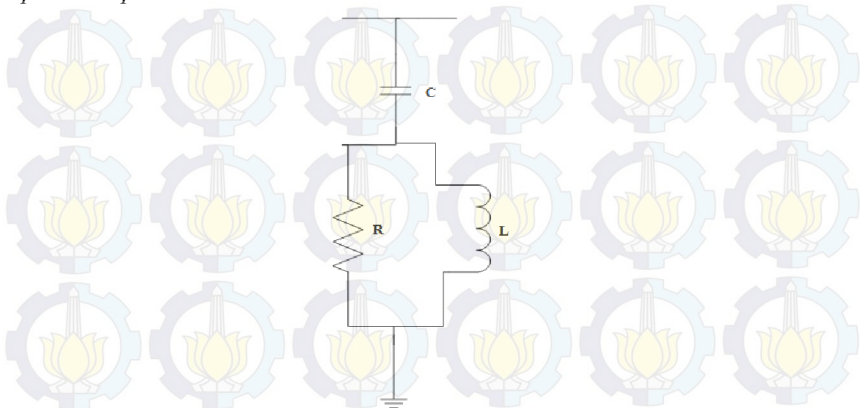
2.5.3. *High pass damped filter*

Filter harmonisa pasif *high pass damped* ini dalam peredaman harmonisanya, umumnya digunakan untuk meredam atau mereduksi harmonisa pada orde dengan frekuensi tinggi. Pada sistem tenaga listrik biasanya untuk meredam orde harmonisa ke 11th, 23th dan 25th.

High pass damped filter memiliki kelemahan yaitu rugi-rugi daya yang sangat besar, hal tersebut karena ditimbulkan dari besarnya resistansi yang dihasilkan filter itu. Dan juga reaktansi antara induktansi dan kapasitansi filter tersebut sangat besar. Maka pemasangan filter harmonisa ini sangat memperhitungkan besar dari daya fundametal yang ada pada sistem.

Selain itu pada kondisi real di plant pemasangan filter *high pass damped*, umumnya selalu dilengkapi oleh frekuensi rendah, apabila tidak, maka harmonisa bertambah pada frekuensi yang lebih rendah.

Berikut ini gambar rangkaian dari filter hamonisa pasif *high pass damped* orde dua.



Gambar 2.3. Filter harmonisa *high pass damped* orde dua

Filter harmonisa pasif *high pass damped* orde dua akan membentuk rangkaian impedansi sebagai berikut [3]:

$$Z = \frac{1}{\omega C} \times \frac{R\omega L}{R + \omega L} \quad (2.5)$$

$$Z = \frac{\omega^2 RL^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \left(\frac{R^2 \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.6)$$

Filter harmonisa pasif *high pass damped* juga memiliki kualitas faktor (Q), umumnya menggunakan lebih kecil dari pada di filter *single tuned*, biasanya dipilih 20, Faktor kualitas *high pass damped* yaitu perbandingan antara resistansi pada filter berbanding dengan induktansi saat resonansi [5].

$$Q = \frac{R}{X_L} \quad (2.7)$$

dimana:

X_L = Induktansi

R = Resistansi

Terdapat referensi mengenai perhitungan untuk mencari komponen filter pada sisi resistansi. Berikut ini merupakan rumus untuk mencari resistansi dari filter harmonisa pasif *high pass damped*[6].

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(2\pi f_{\text{fund}})C} \quad (2.8)$$

2.6. Perancangan Filter Harmonisa Pasif

Filter harmonisa pasif sangat penting di sistem distribusi untuk meredam penyebaran harmonisa. Filter harmonisa, selain untuk peredaman harmonisa tegangan maupun arus di sistem distribusi, juga dapat digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif maupun untuk memperbaiki faktor daya pada sistem.

Perancangandilihat dari beberapa aspek, umumnya sudah menentukan nilai kapasitansi yang ada pada pasaran, setelah memilih nilai kapasitor yang sesuai dengan daya fundamnetal pada sistem. Nilai besar kecilnya kapasitor disini selain untuk mencari nilai resonansi dengan induktansi filter itu sendiri, juga digunakan berapa besar kompensasi daya reaktif. Setelah dapat menentukan nilai kapasitor maka kita dapat mecari parameter penyusun filter sebagai berikut:

- 1) Dari kapasitor maka akan mendapatkan reaktansi kapasitif:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(2\pi f_{\text{fund}})C} \quad (2.9)$$

dimana: $F_{\text{(fund)}}$ = frekuensi fundamental

- 2) Karena beresonansi antara kapasitif dan induktif maka:

$$X_L = X_c \quad (2.10)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.11)$$

$$\text{maka } L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{((2\pi f_{\text{harm}})^2 C)} \quad (2.12)$$

dimana: $F_{(harm)}$ = frekuensi harmonisa

- 3) Untuk mencari nilai Resistor maka harus mencari nilai rekatansi dari induktifnya terlebih dahulu.

$$X_L = \omega L = 2\pi f_{(fund)} L \quad (2.13)$$

$$\text{maka } R = \frac{X_L}{Q} \text{ single tuned} \quad (2.14)$$

$$\text{maka } R = X_L \times Q \text{ high pass damped} \quad (2.15)$$

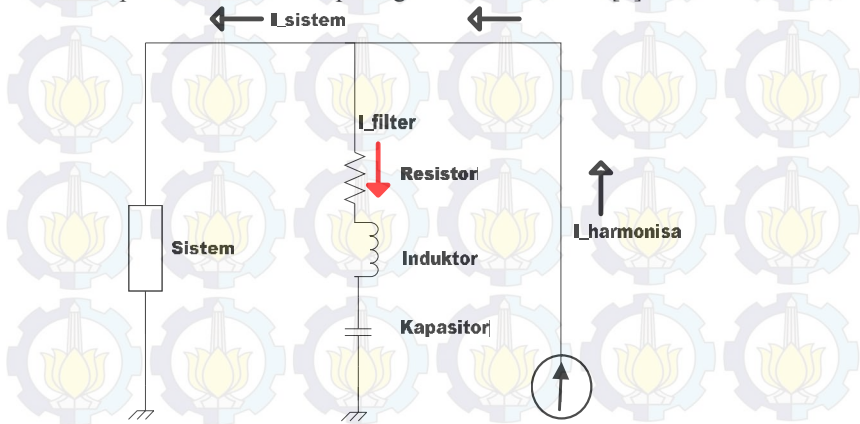
atau

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f_{(fund)} \cdot C} \text{ high pass damped} \quad (2.16)$$

dimana: $F_{(fund)}$ = frekuensi fundamental

$F_{(harm)}$ = frekuensi harmonisa orde ke-th

Filter harmonisa akan menyerap arus harmonisa yang mengalir dari sumber harmonisa yang akan menginjeksi ke sistem. Dengan kata lain filter ini dikorbankan untuk menyerap arus harmonisa yang ada. Hal diatas dapat divisualisasikan pada gambar dibawah ini [7].

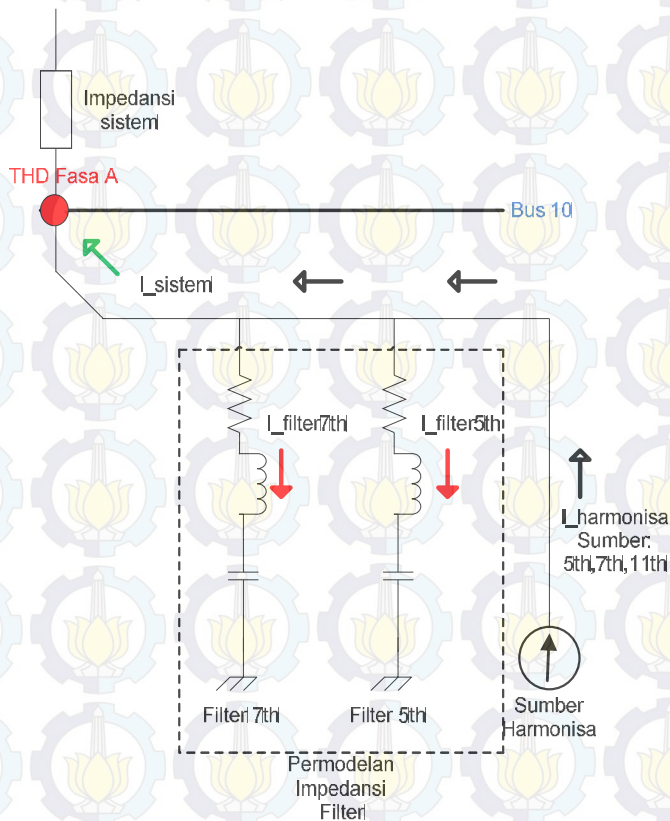


Gambar 2.4 Pemasangan filter harmonisa pasif pada sistem

Pada Gambar 2.7, arus harmonisa ($I_{\text{harmonisa}}$) yang dihasilkan oleh sumber harmonisa, akan menginjeksikan arus ke sistem, tetapi aliran arus harmonisa akan masuk terlebih dahulu ke filter untuk di reduksi (I_{filter}), berikut ini rumus dari keterangan diatas filter:

$$I_{\text{sistem}} = I_{\text{harmonisa}} - I_{\text{filter}} \quad (2.17)$$

Berikut ini merupakan permodelan impedansi dengan beberapa filter harmonisa pasif yang digunakan untuk mengurangi harmonisa yang terjadi disistem.



Gambar 2.5 Permodelan impedansi sistem dengan impedansi filter

Untuk impedansi sistem akan berubah menurut harmonisa yang mengalir pada sistem tersebut, sedangkan untuk permodelan desain impedansi filter harmonisa pasif, menggunakan metode gabungan dari beberapa filter yang digunakan. Untuk mendapatkannya antara filter satu dengan yang lainnya di paralel, sehingga mendapatkan impedansi dari semua filter tersebut.

Secara umum untuk mencari arus harmonisa yang diserap oleh filter atau arus harmonisa yang menginjeksi ke sistem, dengan cara perbandingan arus melalui impedansi. Berikut ini merupakan rumusan dari I_{filter} maupun I_{sistem} dari sumber arus harmonisa.

$$I_{\text{filter}} = \frac{Z_{\text{sistem}}}{Z_{\text{sistem}} + Z_{\text{filter}}} \times I_{\text{harmonisa}} \quad (2.18)$$

$$I_{\text{sistem}} = \frac{Z_{\text{filter}}}{Z_{\text{filter}} + Z_{\text{sistem}}} \times I_{\text{harmonisa}} \quad (2.19)$$

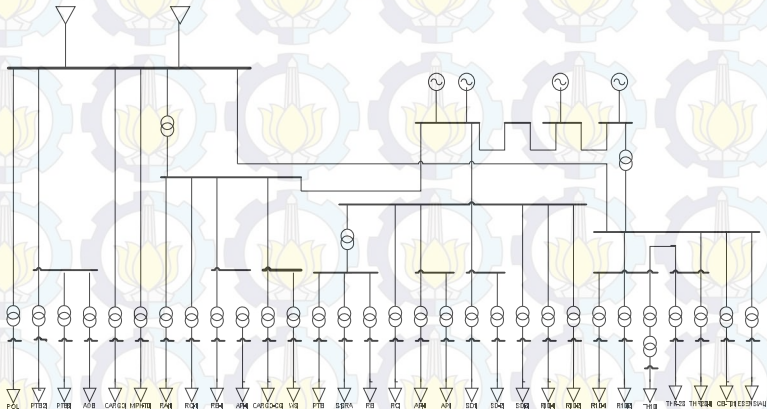
Jadi pada rumus (18) dan (19), dapat diketahui harmonisa yang terjadi pada sistem maupun nilai harmonisa yang diserap oleh filter. Pada rumus tersebut menunjukkan bahwa filter mengalami resonansi yang baik apabila arus yang masuk ke filter (I_{filter}) sama dengan arus harmonisa ($I_{\text{harmonisa}}$) atau ($I_{\text{filter}} = I_{\text{harmonisa}}$). Dengan kata lain impedansi filter sama dengan nol sehingga $I_{\text{harmonisa}}$ dikalikan satu [5]. Untuk arus harmonisa yang mengalir ke sistem diharapkan apabila terjadi resonansi maka $I_{\text{sistem}} < I_{\text{harmonisa}}$ maka perbandingan impedansi yang terjadi harus sekecil mungkin atau $\neq 1$, apabila hal tersebut terjadi filter akan menyerap harmonisa dan harmonisa pada sistem akan direduksi seminimal mungkin.

BAB III

SISTEM TENAGA LISTRIK BANDARA INTERNASIONAL JUANDA SURABAYA

3. 1. Bandara Internasional Juanda Surabaya

Sistem kelistrikan Bandara Juanda merupakan sistem yang terdiri dari 2 sumber yaitu dari PLN sebesar 20 kV menggunakan dua feeder utama sedati yang terhubung dengan Main Power House utama sebagai sumber utama untuk menyuplai seluruh sistem kelistrikan Bandara dan menggunakan generator sebanyak empat buah dengan kapasitas masing-masing 1500 kVA. Sebagai sumber cadangan,, generator hanya digunakan apabila PLN mengalami gangguan dan hanya mensuplai sistem yang vital dalam jangka waktu tertentu. Sistem kelistrikan Juanda sampai saat ini masih mengandalkan suplai dari PLN 20 kV, karena sudah adanya kesepakatan kerja antara pihak PT.Angkasa Pura I sebagai pengelola bandara Juanda Surabaya dengan pihak PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur sebagai penanggung jawab unit kerja distribusi PLN di Bandara Juanda yang merupakan konsumen prioritas utama dalam pemakaian listrik. Secara umum single line diagram kelistrikan di Bandara Juanda dapat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Single line diagram Bandara Juanda

Tabel 3.1 Data beban Bandara Juanda Essential dan General

ID	SERVICE	(kVA)	KET.
POL	Pertamina	788	AVTUR
CHL	Cabin Chiller	1093	PUBLIK
PTB-1	Passenger Terminal Bulding	1287	PUBLIK
PTB-2	Passenger Terminal Bulding	1287	PUBLIK
PTB-3	Passenger Terminal Bulding	1287	PUBLIK
AOB	Operation Bulding 1	282	CREW
CG	Cargo	235	PUBLIK
MPH-TO	Main Power Bulding	18,5	CREW
RA	Parking Area	22,5	PUBLIK
RB	Bulding Area	22,8	PUBLIK
R28	Run Way 28	110,87	CREW
TH10	Tower Area	50,91	CREW
OB	Operational Bulding 2	150	CREW
RC	Service Car Area	91,6	PUBLIK
AP-1	Apron	83,37	CREW
AP-2	Apron	96,42	CREW
SD-1	Hanggar-1	891	CREW
SD-2	Hanggar-2	241	CREW
SD-3	Hanggar-3	353	CREW
R10	Run Way 10	144,44	CREW

3. 2. Kategori Beban

Pada umumnya setiap bandara yang beroperasi baik untuk sipil dan militer disuplai dari jaringan publik yaitu (PLN) dengan tegangan menengah/TM 20 KV dan tegangan rendah/TR, 220/380 V, 50 Hz, 3 phase. Direkomendasikan bahwa suplai jaringan listrik PLN didapat dari 2 (dua) buah feeder yang terpisah dan tidak tercampur dengan kebutuhan masyarakat. Namun satu daya utama juga dapat diperoleh dari suplai pembangkit inilik sendiri (inisalnya dari Genset,

solar cell dan lain-lain.). Sistem catu daya listrik untuk fasilitas Visual Aids dan Navigasi Radio di bandar udara memerlukan keandalan yang sangat tinggi.

3.2. 1. Kategori satu atau jaringan prioritas

Untuk fasilitas teknikal dan general (umum) diperlukan catu daya yang kontinyu atau terputusnya catu daya hanya diijinkan untuk waktu yang sangat singkat. Jaringan ini harus di back up dengan genset 1. Peralatan prioritas teknikal :

- Radio Aids
- Visual Aids
- Gedung operasi
- Stasiun observasi MET
- Sebagian dari stasiun Pembangkit (Penerangan dan AC)

3.2. 2. Peralatan prioritas umum :

- Lampu-lampu signal dan penerangan minimum yang diperlukan bagi petugas ATC dalam melaksanakan tugasnya.
- Seluruh Obstacle Light yang dianggap esensial untuk keselamatan operasi pesawat.
- Lampu-lampu approach, runway dan taxiway.
- Peralatan Meteorologi.
- Penerangan untuk fasilitas keamanan yang esensial.
- Perlengkapan yang penting untuk fasilitas keadaan darurat.
- Lampu-lampu penerangan Apron (Flood Light).
- AC untuk ruang komputer, terminal penumpang (IAIS, CIS,PAS dan deteksi pemadam kebakaran)
- Check-in area (Ticketing counter, bagasi, konveyor)
- AC restoran, ruang keberangkatan, ruang transit dan kantor
- Lemari pendingin (Kulkas) restoran
- Sistem penerangan terminal
- Waterplan dan water storage
- Penerangan apron (Flood light)
- Gedung VVIP
- Stasiun Pemadam kebakaran
- Boarding bridges (Garbarata)

3.2. 3. Kategori dua atau jaringan general

Fasilitas general keadaan normal akan disuplai dari PLN dengan tegangan menengah atau tegangan rendah. Fasilitas ini tidak menuntut catu daya kontinyu dan akan tetap mati bila catu daya utama (PLN) putus.

- Sebagian/keseluruhan AC
- Sebagian penerangan terminal penumpang dan gedung umum
- Penerangan untuk sebagian jalan dan parkir
- Instalasi komersiel

3. 3. Sistem Distribusi Listrik Bandara Juanda

Pada sistem yang ada di Bandara Juanda dalam operasinya dilengkapi dengan beberapa peralatan seperti transformator, relay, circuit breaker yang digunakan untuk masing-masing beban dengan kategori tertentu. Untuk lebih jelas mengenai peralatan transformator yang digunakan pada single line diagram dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Data kapasitas transformator sistem Bandara Juanda

No	ID	KVA	KV	%Z	Hubungan
1	T01-POL	1500	20/0,38	6	Δ/Y
2	T01-CHL	2000	20/6,6	6	Δ/Y
3	T01-PTB	2000	20/0,38	6	Δ/Y
4	T01-PTB	2500	20/0,38	6	Δ/Y
5	T01-OB	200	20/0,38	4	Δ/Y
6	T01-CG	500	20/0,38	4	Δ/Y
7	T01-MPH	4500	20/6,6	7	Δ/Y
8	T04-MPH	200	6,6/0,38	4	Δ/Y
9	T01-RA	50	6,6/0,38	4	Δ/Y
10	T1-RC	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
11	T01-RB	50	6,6/0,38	4	Δ/Y
12	T01-A2	50	6,6/0,38	4	Δ/Y

13	T01-A1	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
14	T02-CG	160	20/0,38	4	Δ/Y
15	T01-WS	315	20/0,38	4	Δ/Y
16	T03-WS	2500	20/0,38	6	Δ/Y
17	T02-MPH	3000	6,6/20	7	Δ/Y
18	T02-RA	50	6,6/0,38	4	Δ/Y
19	T02-RB	50	6,6/0,38	4	Δ/Y
20	T01-RC	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
21	T01-API	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
22	T02-AP2	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
23	T02-SDI	630	6,6/0,38	4	Δ/Y
24	T02-SD2	250	6,6/0,38	4	Δ/Y
25	T03-SD3	400	6,6/0,38	4	Δ/Y
26	T01-R10	160	20/0,38	4	Δ/Y
27	T02-R10	160	20/0,38	4	Δ/Y
28	T03-R10	100	20/0,38	4	Δ/Y
29	TH-10	100	6,6/0,38	4	Δ/Y
30	T01-R28	200	20/0,38	4	Δ/Y
31	T02-R28	200	20/0,38	4	Δ/Y
32	T02-OB	630	20/0,38	4	Δ/Y
33	T2-MPH03	300	20/0,38	4	Δ/Y
34	T1-MPH03	1500	6,6/20	4	Δ/Y

3. 4. Beban pada sistem Bandara Juanda

Pada sistem kelistrikan bandara Juanda. Setiap beban memiliki fungsi tertentu dengan kategori prioritas maupun untuk general seperti lampu runway yang berfungsi sebagai petunjuk sistem pendaratan dan lepas landas pesawat dan beban-beban lainnya baik untuk fasilitas kenyamanan penumpang maupun untuk peralatan navigasi dan komunikasi.

Baik buruknya suatu sistem distribusi dapat dinilai dari beberapa parameter sebagai berikut :

3.4. 1. Kontinuitas pelayanan

Kontinuitas pelayanan yang baik adalah penyaluran daya yang tidak sering terjadi pemutusan baik karena adanya gangguan maupun akibat hal-hal yang direncanakan seperti perbaikan. Kontinuitas yang baik biasanya diberikan kepada beban-beban penting yang sangat tidak dikehendaki adanya pemadaman. Beban-beban seperti ini contohnya instalasi militer, pelayanan telekomunikasi, rumah sakit, dan lain-lain.

3.4. 2. Kualitas daya

Kualitas daya yang baik berhubungan dengan beberapa parameter listrik yang sampai ke pelanggan sehingga tidak mengganggu performa peralatan yang ada pada pelanggan seperti tegangan konstan dan nominal (drop tegangan saluran kecil), daya terpenuhi, memiliki nilai harmonisa yang kecil dan frekuensi yang stabil.

3.4. 3. Perluasan dan penyebaran

Semakin luas daerah yang harus dilayani oleh saluran distribusi/penyulang, maka keseimbangan beban harus benar-benar diperhatikan. Karena pada umumnya sistem distribusi tiga fasa melayani beban-beban yang secara natural tidak seimbang. Sehingga perlu adanya pengaturan konfigurasi saluran yang dapat mengurangi faktor ketidakseimbangan beban pada saluran.

3.4. 4. Pengembangan sistem yang fleksibel

Sistem distribusi yang baik adalah apabila didesain untuk dapat dikembangkan. Sebaiknya setiap penyulang tidak didesain hanya dapat bekerja optimal jika digunakan untuk melayani kebutuhan sesaat. Tetapi harus dapat digunakan untuk melayani perubahan beban apabila terdapat pengembangan jaringan atau daerah yang dilayani diperluas.

3.4. 5. Kondisi dan situasi lingkungan

Faktor ini merupakan pertimbangan yang dilakukan untuk menentukan tipe-tipe saluran distribusi yang cocok untuk diterapkan di suatu daerah. Beberapa contoh pertimbangannya adalah jenis konduktor, konfigurasi, tata letak, dan pertimbangan dari segi estetika.

3.4. 6. Ekonomis

Dalam membangun maupun melakukan pengembangan sistem distribusi harus dipertimbangkan beberapa hal dari segi ekonomi, baik dalam tujuan komersil maupun dalam usaha penghematan anggaran.

3. 5. Kegiatan pengukuran listrik Bandara Internasional Juanda

Data penunjang mutlak dibutuhkan untuk tahap simulasi. Pada tahap ini penulis menggunakan data yang didapat dari single line diagram, survey lapangan, dan pengukuran secara langsung di lapangan. Single line diagram berikut laju aliran daya dapat dilihat pada Gambar 3.1 dimana untuk pengambilan data besaran harmonisa pada tahap awal akan dilakukan di lima titik menggunakan FLUKE-434. Pengambilan lima titik bertujuan untuk mendapatkan perbandingan bus yang memiliki nilai harmonisa paling besar, sehingga diharapkan dari data yang didapat bisa ditarik kesimpulan mengenai beban penyumbang harmonisa dominan dan mendapatkan kombinasi terbaik untuk meletakkan filter penurun harmonisa di titik bus yang paling sesuai. Adapun kelima bus yang dijadikan titik pengukuran pada tahap awal ini adalah bus pol (milik Pertamina), bus 17, bus OB, bus panel PTB 20 kv, bus MPH 11 6,6 kv, dan bus MPH 3 20 kv.

Kegiatan pengukuran dilakukan pada panel ukur dengan referensi tegangan dan arus. Terdapat dua cara yang dapat digunakan untuk pengambilan harmonisa tegangan, yaitu pengambilan data langsung pada terminalnya (untuk tegangan rendah) dan untuk tegangan 20 kV keatas diperlukan PT (Potensial Transformator) yang berfungsi untuk menurunkan tegangan sehingga tidak membahayakan saat proses pengukuran. Sama halnya untuk pengukuran arus, pada tegangan tinggi diperlukan CT (Current Transformator) sehingga tidak membahayakan saat proses pengukuran.

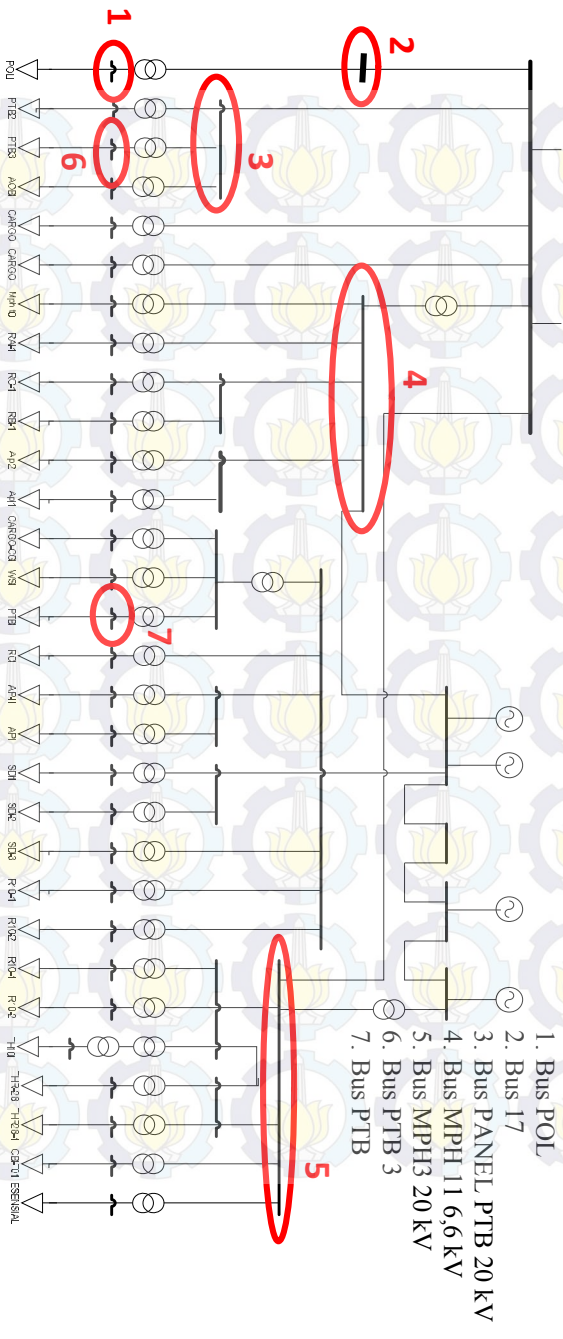


Gambar 3.2.a. Peralatan yang digunakan dalam pengukuran.

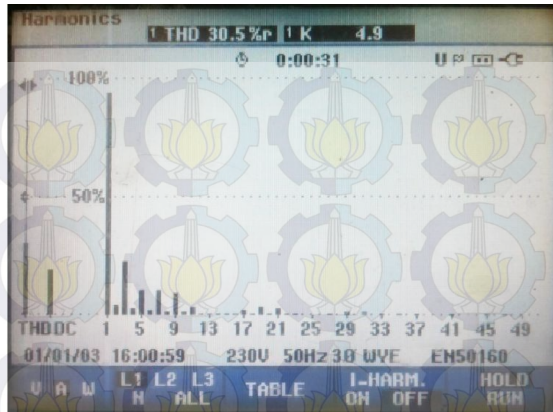


Gambar 3.2. b. Kegiatan pengukuran di bus 17 menggunakan FLUKE-434

Sistem Tenaga Listrik Bandara Juanda



Gambar 3.3 Single line diagram sistem tenaga listrik juanda dan Load Flow



Gambar 3.4 Display FLUKE-434 saat pengukuran harmonisa arus dengan nilai THD_i 30,5%

3. 6. Data pengukuran listik Bandara Internasional Juanda

3.2. 1. Bus POL (PT Pertamina 0,38kV)

Bus POL merupakan bus dengan tegangan 0,38 kv dari transformator T01-POL (1500 kVA) yang digunakan untuk pendistribusian daya listrik ke PT Pertamina. Pada area ini didapat nilai THD arus dan tegangan yang cukup tinggi yaitu masing-masing 37,01% dan 8,87% dimana batasan toleransi yang diijinkan maksimal 5% dari arus rata-rata fundamentalnya. Secara umum beban-beban di PT Pertamina penyumbang harmonisa diperoreh dari penggunaan UPS, Power Suplay pada penggunaan peralatan elektronik, dan penggunaan lampu hemat energi (LED).

Tabel 3.3 Data ukur lapangan pada bus POL (PT. Pertamina 0,38kV)

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	1,74	1,64	27	0,54	0,41
5	7,76	33,84	29	0,54	0,41
7	2,54	13,97	31	0,54	0,41

9	1,34	1,51	33	0,40	0,41
11	1,07	4,52	35	0,40	0,41
13	0,94	0,68	37	0,40	0,41
15	0,80	0,68	39	0,40	0,41
17	0,80	0,55	41	0,40	0,41
19	0,80	0,55	43	0,40	0,41
21	0,67	0,55	45	0,27	0,41
23	0,54	0,55	47	0,27	0,41
25	0,54	0,55	49	0,27	0,41

3.2. 2. Bus 17 (PT Pertamina 20kV)

Bus 17 merupakan bus pendistribusi daya listrik dari bus MPH M01 melalui kabel sepanjang 1 Km dan diserahkan ke transformator T01-POL (1500 kVA). Dari pengukuran didapat nilai THD tegangan sebesar 1,68% dan THD arus 21,97% melebihi toleransi maksimal yang diijinkan 5% dari rata-rata fundamentalnya. Harmonisa diperoleh dari distribusi bus POL yang melalui transformator dan bus MPH M01.

Tabel 3.4 Data ukur lapangan pada bus 17 (PT. Pertamina20kV)

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	0,20	3,52	27	0,00	0,74
5	1,00	17,59	29	0,00	0,74
7	1,20	12,04	31	0,00	0,74
9	0,10	0,54	33	0,00	0,74
11	0,50	0,54	35	0,00	0,74
13	0,20	1,11	37	0,00	0,74
15	0,00	1,48	39	0,00	0,74
17	0,00	0,74	41	0,00	0,74
19	0,10	0,93	43	0,00	0,74
21	0,00	0,74	45	0,00	0,74
23	0,10	1,48	47	0,00	0,74
25	0,10	1,11	49	0,00	0,74

3.2. 3. Bus Panel PTB (20 kV)

Bus Panel PTB (20 kV) merupakan bus yang berfungsi untuk mendistribusikan daya listrik dari bus MPH M01 melalui kabel ke transformator T01-CHL (2000kVA), T01-PTB(2000kVA), dan T02 PTB (2500kVA). Dimana nilai THD arus dan tegangan masing-masing didapat 21,32% dan 2,88% dari toleransi yang diijinkan maksimal 5%. Secara umum beban-beban penyumbang harmonisa di bus ini adalah penggunaan konveyor dan eskalator (yang menggunakan VSD), penggunaan Power Suplay pada peralatan elektronik dan pemakaian lampu hemat energi (LED).

Tabel 3.5 Data ukur lapangan pada bus panel PTB (20kV)

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	1,00	4,31	27	0,05	1,38
5	2,00	17,69	29	0,05	1,38
7	1,30	7,23	31	0,05	1,08
9	0,15	4,46	33	0,05	1,08
11	1,00	3,08	35	0,05	0,92
13	0,70	2,77	37	0,05	1,08
15	0,10	2,15	39	0,05	1,08
17	0,15	2,31	41	0,05	1,08
19	0,05	1,69	43	0,05	1,08
21	0,05	1,54	45	0,05	0,92
23	0,05	1,54	47	0,05	0,92
25	0,05	1,38	49	0,05	0,92

3.2. 4. Bus MPH 11(6,6kV)

Merupakan bus yang digunakan untuk mendistribusikan daya listrik dari bus MPH M01 ke beban-beban transformator 6,6 kV. Pada bus ini didapat nilai harmonisa paling dominan bila dibandingkan

dengan nilai harmonisa bus yang lain yaitu untuk THD arus 41,46% dan THD tegangan 12,58%. Beberapa beban penyumbang harmonisa diantaranya adalah pemakaian konveyor dan eskalator yang menggunakan VSD, pemakaian power suplay, pemakaian lampu hemat energi (LED).

Tabel 3.6 Data ukur lapangan pada bus panel MPH11(6,6kV)

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	3,52	5,45	27	0,68	0,55
5	9,00	34,73	29	0,64	0,55
7	5,60	21,64	31	0,20	0,55
9	2,16	2,18	33	0,56	0,55
11	4,24	2,00	35	0,52	0,55
13	1,48	0,73	37	0,48	0,55
15	1,28	0,55	39	0,40	0,55
17	1,04	0,55	41	0,44	0,55
19	1,04	0,73	43	0,44	0,55
21	0,92	0,55	45	0,44	0,55
23	0,84	0,55	47	0,36	0,55
25	0,72	0,55	49	0,36	0,55

3.2. 5. Bus OB

Pada bus ini berperan untuk menyalurkan daya listrik dari bus MPH M01 dengan tegangan yang diturunkan transformator T01-OB sebesar 0,36 kV, ke beban AOB (Operation Bulding 1). Dari pengukuran didapat nilai harmonisa arus dan tegangan masing-masing 38,11% dan 1,96%. Beberapa beban penghasil harmonisa yang terdapat pada beban AOB seperti power suplay.

Tabel 3.7 Data ukur lapangan pada bus OB

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	0,55	6,58	27	0,15	3,68
5	1,75	26,32	29	0,15	3,42
7	0,10	18,42	31	0,10	3,42
9	0,20	5,53	33	0,10	3,16
11	0,45	10,53	35	0,10	3,16
13	0,15	5,00	37	0,10	3,42
15	0,10	3,16	39	0,15	3,16
17	0,15	2,89	41	0,15	3,16
19	0,10	4,47	43	0,15	3,42
21	0,10	3,68	45	0,10	3,16
23	0,15	4,47	47	0,10	2,63
25	0,15	3,42	49	0,10	3,16

3.2. 6. Bus MPH 3 20kV

Pada bus ini berfungsi untuk mengalirkan daya dari bus MPH M01 ke beberapa beban dengan nilai hasil pengukuran harmonisa arus dan tegangan masing-masing 30,84% dan 2,99%. Beberapa beban penghasil harmonisa ditemui seperti penggunaan power suplai pada peralatan pemandu penerbangan, crane di hanggar, dan penggunaan konveyor bagasi yang menggunakan VSD.

Tabel 3.8 Data ukur lapangan pada bus MPH 20kV

Orde	%THD		Orde	%THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	2,65	4,00	27	0,06	0,42
5	0,35	23,37	29	0,12	1,47
7	0,12	11,37	31	0,06	1,47
9	1,06	10,00	33	0,06	0,53
11	0,29	11,16	35	0,06	0,53

13	0,41	0,84	37	0,00	0,42
15	0,29	0,95	39	0,06	0,42
17	0,18	1,89	41	0,00	0,63
19	0,29	3,58	43	0,00	0,32
21	0,24	3,05	45	0,00	0,42
23	0,18	1,05	47	0,00	0,53
25	0,29	0,32	49	0,00	0,32

3.2. 7. Bus PTB3 (0,38kV)

Pada Bus PTB3 berfungsi mendistribusikan daya listrik dari transformator T02-BTB (2500kVA) ke beban PTB3 yaitu terminal penumpang tiga. Harmonisa pada bangunan ini cukup tinggi yaitu sekitar 13,66% untuk THD tegangan dan 31,61% untuk THD arus. Beban-beban penghasil harmonisa pada gedung adalah pemakaian VSD pada konveyor bagasi, pemakaian VSD eskalator, dan penggunaan power suplai.

Tabel 3.9 Data ukur lapangan pada bus PTB3(0,38kV)

Orde	% THD		Orde	% THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	1,33	3,91	27	0,13	1,96
5	11,60	27,17	29	0,13	1,96
7	4,80	10,22	31	0,13	1,52
9	2,67	6,30	33	0,13	1,52
11	4,00	4,35	35	0,13	1,30
13	1,87	3,91	37	0,13	1,52
15	0,27	3,04	39	0,13	1,52
17	0,40	3,26	41	0,13	1,52
19	0,13	2,39	43	0,13	1,52
21	0,13	2,17	45	0,13	1,30
23	0,13	2,17	47	0,13	1,30
25	0,13	1,96	49	0,13	1,30

3.2. 8. Bus PTB (0,38kV)

Berfungsi untuk medistribusikan daya listrik dari transformator T03-PTB (2500kVA) ke beban PTB yaitu terminal penumpang satu. Bangunan pada bangunan ini cukup tinggi yaitu sekitar 37,48% untuk THD tegangan dan 57,00% untuk THD arus. Pemakaian beban penghasil harmonisa pada bangunan ini sama seperti pada terminal penumpang tiga yaitu pemakaian VSD pada konveyor bagasi, pemakaian VSD eskalator, dan penggunaan power suplai.

Tabel 3.10 Data ukur lapangan pada bus PTB (0,38kV)

Orde	% THD		Orde	% THD	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	3,23	2,75	27	1,83	0,75
5	15,05	29,75	29	1,72	0,75
7	30,43	47,75	31	0,54	0,75
9	5,81	3,00	33	1,51	0,75
11	11,40	7,50	35	1,40	0,75
13	3,98	1,00	37	1,29	0,75
15	3,44	0,75	39	1,08	0,75
17	2,80	0,75	41	1,18	0,75
19	2,80	1,00	43	1,18	0,75
21	2,47	0,75	45	1,18	0,75
23	2,26	0,75	47	0,97	0,75
25	1,94	0,75	49	0,97	0,75

BAB IV

ANALISA HARMONISA DAN PERENCANAAN FILTER PEREDAM HARMONISA

4. 1. Simulasi data pada ETAP 12

a. Gambaran beban penghasil harmonisa

Keberadaan harmonisa pada sistem tenaga listrik merupakan efek dari penggunaan beban yang menggunakan power elektronik seperti penggunaan VSD (Virtual Speet Drive), konverter dan Power Suplay. Di Bandara internasional Juanda (khusus di terminal satu) beban harmonic dihasilkan dari penggunaan empat unit eskalator pada terminal penumpang, penggunaan conveyor pada terminal bagasi, pemakaian beberapa set x-ray pada pintu masuk terminal, pemakaian lampu hemat energi LED untuk penerangan, komputer, pengoprasian 12 garbarata, pemakaian pintu otomatis dan pemakaian peralatan keselamatan penerbangan pada ruang ATC (Aircraf Terminal Control).

Pada bus POL di PT Pertamina sumber harmonisa dihasilkan oleh Pemakaian lampu hemat energi LED, pemakaian UPS sebagai *back up* daya listrik peralaaan elektronik vital, dan penggunaan komputer.

b. Pemilihan data

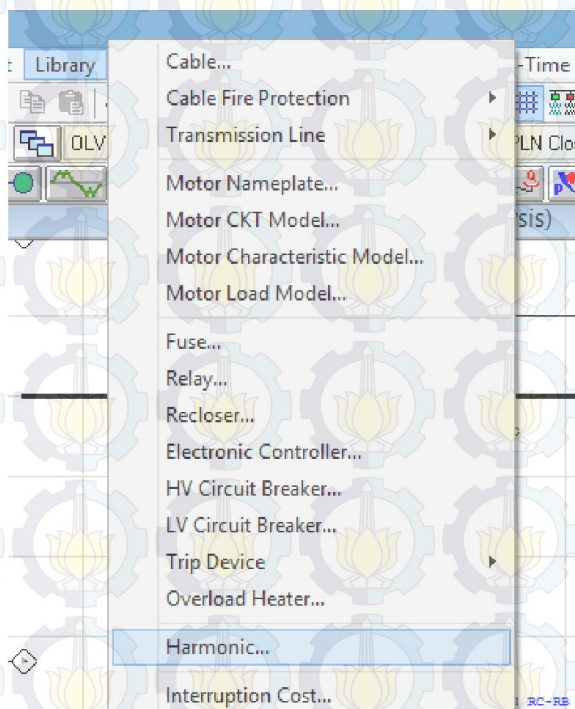
Untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat, perlu dilakukan pemilihan data yang dapat mewakili load flow harmonisa di setiap bus. Beberapa data hasil pengukuran seperti pada bus POL, bus 17, bus panel PTB, bus MPH 11, bus PTB3, bus PTB, dan bus1 MPH3 harus memenuhi spesifikasi data sebagai bahan simulasi di program ETAP 12 yaitu memiliki nilai harmonisa paling tinggi, bus yang terdekat dengan beban penyumbang harmonisa, dan jenis daya beban terutama penghasil harmonisa.

Dari tiga sepect data yang diminta, hanya tiga data yang memenuhi syarat untuk mewakili load flow harmonisa yaitu data pada bus POL, Bus PTB3, dan PTB yaitu data yang memiliki nilai THD arus dan tegangan tinggi, dekat dengan beban, dan adanya sumber penghasil harmonisa dominan yaitu pada bus POL terdapat UPS kapasitas 13

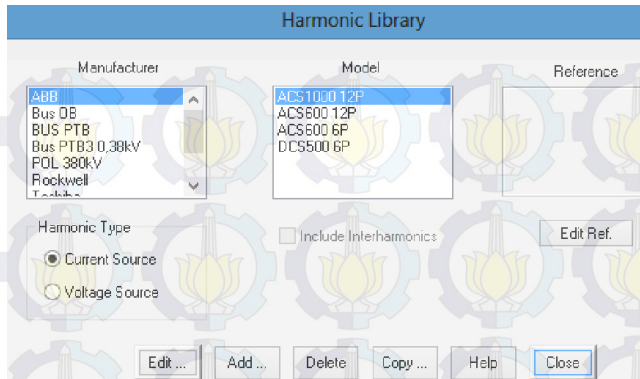
kVA, pada bus PTB3 dan PTB terdapat VSD untuk konveyor dan eskalator.

c. Up date library dari data ukur

Agar data yang diperoleh dari pengukuran dapat disimulasikan pada program ETAP 12.6.0, maka data pengukuran harus dimasukkan pada program. Cara untuk memasukkan data yaitu dengan update *harmonic library* dengan cara memilih *menu - library*, setelah muncul tampilan *harmonic library* pilih *current source* untuk harmonisa arus atau *voltage source* untuk harmonisa tegangan pada group *harmonic type* dan *click add*. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan tampilan harmonic library di ETAP 12.6.0.



Gambar 4.1 Menu Harmonic Library ETAP 12.6.0

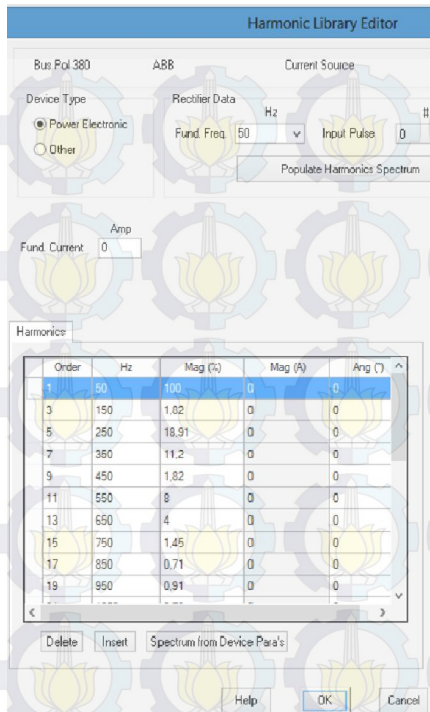


Gambar 4.2. Tampilan *Harmonic Library* ETAP 12.6.0

Pada persebaran *harmonic load flow* frekuensi orde genap sering tidak terdistribusikan karena diredam oleh peralatan transmisi seperti kabel dan transformator. Beda dengan orde ganjil yang bisa lolos di peralatan transmisi meskipun ada sedikit peredaman terutama di orde lima, tujuh, dan sebelas, sehingga pada orde ini sering didapati memiliki nilai IHD yang cukup tinggi.

Input data harmonisa di library ETAP 12.6.0 hanya menggunakan orde ganjil karena rata-rata nilai IHD orde genap pada pengukuran kecil, sehingga keberadaan orde genap diabaikan. Orde ganjil pada pengukuran dimulai dari 3, 5, 7 s/d 49. Gambar 4.3 merupakan editor IHD harmonisa dari orde 3 sampai 49 dari data ukur di bus POL milik PT. Pertamina Aviassi. Dari gambar menunjukkan orde yang memiliki nilai IHD arus tertinggi ada di orde lima yaitu 33,8% dari nilai fundamentalnya.

Pada Gambar 4.3 merupakan tampilan dari harmonic library editor di ETAP 12.6.0. Dari dambar dapat dilihat tabel yang berfungsi untuk memasukkan data harmonisa dengan cara click insert sehingga muncul kolom baru. Diagram sebelah kanan tabel menunjukkan tampilan gelombang sinus dari arus atau tegangan, serta diagram spektrum orde menunjukkan nilai IHD yang dimasukkan dari tabel.



Gambar 4.3 *Harmonic Library Editor* di ETAP 12.6.0

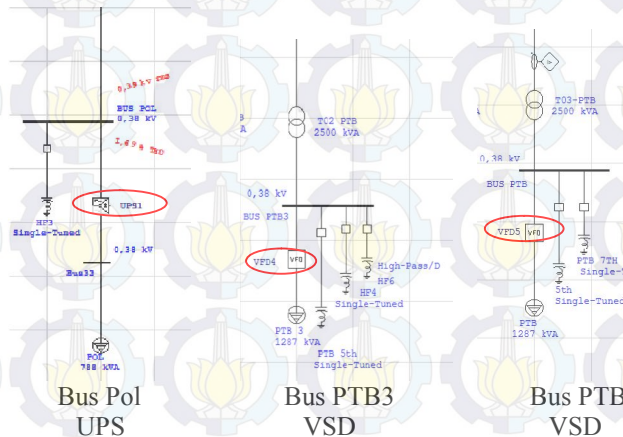
d. Aplikasi beban harmonisa dengan tool UPS dan VSD

Banyak tool yang dapat digunakan untuk simulasi beban penghasil harmonisa, beberapa diantaranya adalah UPS, VSD, Transformator, konverter baik AC to AC atau AC to DC, dan Power Suplay. Tetapi penggunaan tool di ETAP yang paling sesuai dalam simulasi harus bisa mewakili data di lapangan yang memiliki harmonisa dominan.

Seperti pada bus POL di plant PT. Pertamina, banyak ditemui variasi beban penghasil harmonisa seperti penggunaan UPS, Power suplay, dan Lampu hemat energi seperti LED. Dari beberapa beban penyumbang harmonisa didapati UPS merupakan penyumbang harmonisa dominan

maka pada simulasi di bus POL digunakan beban UPS sebagai penghasil harmonisanya dominannya.

UPS merupakan peralatan elektronik yang pada oporasnya membutuhkan power konveter AC to DC untuk suplay tegangan rendahnya. Tegangan DC ini diperlukan untuk carging batrai dan beberapa elektronika lain yang membutuhkan tegangan DC. Power konverter ini lah yang menyebabkan terjadinya gangguan tegangan dan arus harmonic kesistem tegangan listrik.



Gambar 4.4 Simulasi harmonisa dengan tool VSD dan UPS di di ETAP 12.6.0

Setelah melakukan pemasangan *tools* UPS/VSD pada bus yang telah dipilih untuk mewakili beban penyumbang harmonisa dominan, selanjutnya setting nilai rating input/output dengan *double click tools* VSD/UPS yang telah dipasang pada bus dan memilih di *tap rating*. Gambar 4.5 menunjukkan tampilan tap raing pada tools UPS dengan rating 788 kVA dan DC rating 110 volt.

Untuk memberikan besaran nilai IHD arus dari pengukuran yang sebelumnya telah dimasukkan dari *harmonic library* kedalam tools UPS/VFD yang telah dibuat,

yaitu dengan cara **double click** pada **tools**, lalu pilih tab **harmonic**, kemudian pilih library yang sebelumnya di buat dengan click **library**. Pada gambar 4.6 merupakan diagram bentuk gelombang dan spektrumnya dari tampilan tap harmonic dari property UPS di bus POL milik PT Pertamina.

Pada gambar 4.8 menunjukkan diagram bentuk gelombang dan spektrum IHD yang diberikan ke properti VFD pada bus PTB3 yang telah dimasukkan sebelumnya di harmonic library editor dengan nama library Bus PTB3, dan gambar 4.10 menunjukkan bentuk gelombang dan spektrum IHD di properti VFD pada bus PTB dengan nama library Bus PTB.

UPS Editor - UPS1

Info Rating Loading SC Imp Duty Cycle Harmonic Reliability Remarks Comment

AC Input 0,38 kV Output 0,38 kV 670 kW DC 110 V

AC Rating

Output Input

kW 670 kV 0,38 kV 0,38 % EFF 100

kVA 788 FLA 1197 FLA 1197 % PF 85

DC Rating

V 110

FLA 6089

DC Operating Voltage

☒ Rated V ☐ User-Defined

110 V

Bypass Switch Status

Imax 150 %

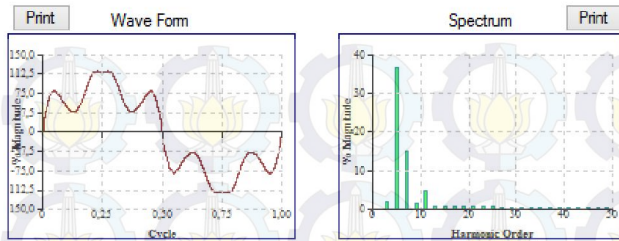
DC System Charging

☒ Blocked by Auction Diode

UPS1

OK Cancel

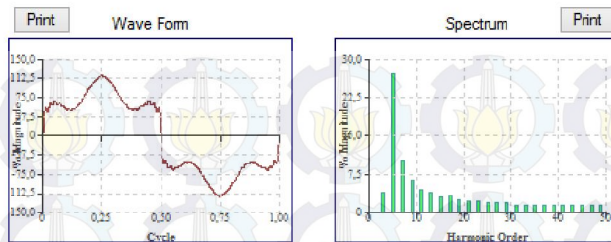
Gambar 4.5 Tab rating pada property UPS di bus POL



Gambar 4.6 Tab harmonic pada *property* UPS bus POL

The figure shows a 'Variable Frequency Drive Editor - VFD4' dialog box. It has several tabs: Info, Rating, Loading, Start Dev, Control, Harmonic, Reliability, Remarks, and Comment. The 'Rating' tab is selected. The dialog box contains various fields for configuring the VFD. The output rating is 1287 kW and 1287 kVA at 0.38 kV. The input rating is 1514 kVA at 0.38 kV. Other fields include frequency (50 Hz), FLA (1955), PF (100%), and SC Contribution to Output Term. (150%).

Gambar 4.7 Tab rating pada *property* VSD di bus PTB3



Gambar 4.8 *Tab harmonic pada property VFD bus PTB3 di terminal penumpang*

Variable Frequency Drive Editor - VFD5

Info Rating Loading Start Dev Control Harmonic Reliability Remarks Comment

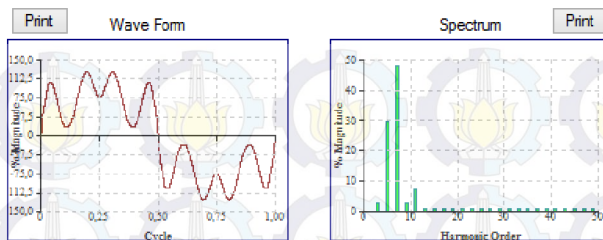
0,38 kV 1094 kW

Output				Input			
	Max	Min					
kW	1094		kVA	1287		kV	0,38
kV	110	%	kV	0,38		Freq.	50 Hz
Freq.	150	%	Freq.	50	Hz	FLA	1955
FLA	150	%	FLA	1955		PF	85 %
PF	85 %		PF	85 %		EFF	100 %
Bypass Switch Status				SC Contribution to Output Term.			
Load Flow Analysis <input checked="" type="radio"/> Open <input type="radio"/> Close				K 150 %			
Short Circuit Analysis <input checked="" type="radio"/> Open <input type="radio"/> Close				Isco=K*FLA 2933 A			
Output Grounding				Earthing Type			
<input checked="" type="checkbox"/> Grounded				TN-C			

VFD5

OK Cancel

Gambar 4.9 *Tab rating pada property VSD bus PTB*



Gambar 4.10. Tab harmonic pada property VFD bus PTB di terminal penumpang

4.2. Hasil dan analisa

a. Load Flow Harmonisa

Setelah tools sumber harmonisa dominan dipasang pada plant simulasi ETAP yaitu UPS1 di bus POL, VFD4 di bus PTB3, dan VFD5 di bus PTB, langkah selanjutnya melakukan simulasi load flow. Tabel 4.1 menunjukkan persebaran load flow harmonisa di setiap bus setelah dilakukan pemasangan sumber harminisa di beberapa bus penyumbang harmonisa dominan.

Tabel 4.1 Data nilai %THDv di beberapa bus

No	Nama	%THDv	No	Nama	%THDv
1	Bus 1 MPH13	5,82	16	BUS PTB3	11,90
2	Bus 2 MPH13	5,82	17	BUS RA	5,45
3	Bus 3 MPH13	5,82	18	BUS RA-1	5,45
4	BUS A1	5,31	19	BUS RB	5,48
5	BUS A2	4,79	20	Bus RB-RC	5,82
6	BUS AP-1	5,82	21	BUS RC	5,27
7	BUS AP-II	5,25	22	BUS RC-RB	5,82
8	Bus AP1	5,82	23	Bus SD1	4,78
9	Bus API	5,31	24	Bus SD2	5,24
10	BUS CARGO	13,74	25	Bus SD3	5,28
11	BUS MPH	5,74	26	BUS T02-RB	5,27
12	BUS MPH 11	5,82	27	BUS WS	16,38

13	BUS MPH-M02	18,18	28	BUS-RB	5,48
14	Bus MPH-M12	5,82	29	Bus4 MPH13	5,82
15	BUS PTB	34,84	30	Bus POL	8,22

Dari simulasi didapatkan bus yang dipasang sumber harmonisa memiliki nilai yang tinggi. Pada bus POL nilai THDv nya adalah 8,22%. Pada bus PTB3 nilai THDv nya adalah 11,90%. Dan Bus PTB nilai THDv nya adalah 34,84%.

Dari data diketahui beberapa bus mengalami kenaikan yang signifikan terutama di BUS MPH-M02 dengan kenaikan mencapai 18,18%, dan ada pula yang hanya memberikan sedikit perubahan seperti di MPH M01 dengan nilai 1,55%. Efek dari harmonisa dominan hingga bisa mempengaruhi bus-bus yang lain dipengaruhi ada nya transformator sebagai peralatan transmisi. Transformator ini bersifat meredam harmonisa hingga harmonisa di sisi sekunder hanya berpengaruh kecil terhadap sisi primernya.

4. 3. Rancang filter RCL

Berdasarkan hasil harmonic load flow sebelumnya diketahui banyak bus yang memiliki nilai THD yang melebihi toleransi yaitu 5% untuk itu diperlukan filter penurun harmonisa agar beberapa masalah yang timbul akibat adanya harmonisa bisa dihindari. Ada dua pilihan filter yang dapat dijadikan penurun harmonisa yaitu filter aktif dan filter pasif. Namun pada bagian ini hanya akan dipergunakan perhitungan menggunakan filter pasif sebagai penurun harmonisanya.

Penggunaan filter pasif pada posisi yang tepat, terutama pada daerah yang dekat dengan pembangkit sumber harmonisa sehingga arus harmonisa terjerat disumber dan mengurangi penyebaran arusnya. Dalam kasus ini penempatan filter untuk mengurangi harmonisa pada keseluruhan sistem dipasang pada sumber utama harmonisa yaitu pada bus POL, bus PTB3, dan bus PTB.

Dengan pertimbangan diatas maka perancangan filter akan dimulai dari yang memiliki kontribusi yang paling besar yaitu mulai dari pemasangan pada bus PTB, kemudian bus PTB3 dan yang terakhir bus POL

a Perhitungan spesifikasi filter pada Bus PTB

Perencanaan filter R,C, dan L atau filter pasif pada bus PTB adalah filter single tuned pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 terdapat IHD yang tinggi sehingga diharapkan pemasangan pada orde ke-5 THD pada bus PTB dapat berkurang. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada power faktor beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,85 ke 1. Juga memperhitungkan besaran beban penghasil harmonisa. Berikut perhitungan filter single tuned orde ke lima pada bus PTB.

- **Filter 5th**

Dari simulasi load flow daya reaktif dan daya aktif di ETAP daidapat nilai beban reaktif di bus PTB adalah 678 kVar. Sehingga nilai kapasitor pada filter penurun harmonisa nya adalah:

Total daya reaktif 3 fasa:

$$Q = S(\sin(\cos^{-1}f)) = 1287kVA(\sin(\cos^{-1}0,85))$$

$$Q = 1287(\sin 31,79) = 678 \text{ kVar}$$

Karena pada bus PTB terdapat tiga filter untuk menurunkan nilai %THD yaitu:

5th = Single Tuned orde ke-5

PTB 7th = Single Tuned orde ke-7

Sehingga nilai setting Q pada masing-masing filter adalah

$$5\text{th} + \text{PTB } 7\text{th} = 678 \text{ kVar}$$

$$378 \text{ kVar} + 300 \text{ kVar} = 678 \text{ kVar}$$

Untuk single tuned orde ke lima cukup menggunakan 378 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q_{1fasa}}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{378 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{378000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 0,00833672F = 8336,72 \text{ uF}$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-5. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_l = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 0,00833672F} = 48,66 \times 10^{-6} \text{ Henry}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (48,66 \times 10^{-6}) = 0,01528042 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,01925333}{30} = 0,01528042 \Omega, \text{ dibuat menjadi } 0 \Omega$$

- **Filter PTB 7th**

Untuk single tuned orde ke tujuh dari perhitungan di filter 5th cukup menggunakan 300 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V^2}{X_c} = V^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V^2 \cdot \omega_0} = \frac{300 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{300000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 0,00661644 F = 6616,44 \mu F$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-5. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 350)^2 \times 0,00661644 F} = 31,28 \times 10^{-6} \text{ Henry}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (31,28 \times 10^{-6}) = 0,00982313 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_o}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,00982313}{30} = 0,0003274376 \, \Omega$$

b Perhitungan spesifikasi filter pada Bus PTB3

Perencanaan filter R,C, dan L atau filter pasif pada bus PTB3 adalah filter single tuned pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 terdapat IHD yang tinggi sehingga diharapkan pemasangan pada orde ke-5 THD pada bus PTB3 dapat berkurang. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada power faktor beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,85 ke 1. Juga memperhitungkan besaran beban penghasil harmonisa. Berikut perhitungan filter single tuned orde ke lima pada bus PTB3.

- **Filter PTB 5th**

Dari simulasi load flow daya reaktif dan daya aktif di ETAP daidapat nilai beban reaktif di bus PTB3 adalah 678 kVar. Sehingga nilai kapasitor pada filter penurun harmonisa nya adalah:

$$Q = S(\sin(\cos^{-1}f)) = 1287kVA(\sin(\cos^{-1}0,85))$$

$$Q = 1287(\sin 31,79) = 678 \text{ kVar}$$

Karena pada bus PTB3 terdapat tiga filter untuk menurunkan nilai %THD yaitu:

PTB 5th = Single Tuned orde ke-5

HF4 = Single Tuned orde ke-7

HF6 = Pass Damped orde ke-11

Sehingga nilai setting Q pada masing-masing filter adalah

$$PTB 5th+HF4+HF6 = 678 \text{ kVar}$$

$$300 \text{ kVar} + 200\text{kVar} + 178\text{kVar} = 678 \text{ kVar}$$

Untuk single tuned orde ke lima cukup menggunakan 300 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{300 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{300000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 0,00661644 F = 6616,44 \mu F$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-5. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 0,00661644 F} = 61,32 \times 10^{-6} \text{ Henry}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (61,32 \times 10^{-6}) = 0,01925333 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,01925333}{30} = 0,0006417778 \Omega, \text{ dibuat menjadi } 0 \Omega$$

- **Filter HF4**

Untuk single tuned orde ke tujuh dari perhitungan di filter PTB 5 th cukup menggunakan 200 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{200 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{200000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 4,4109 \times 10^{-3} F = 4410,96 \mu F$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-7. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 350)^2 \times 4,4109 \times 10^{-3} F} = 46,93 \times 10^{-6} \text{ Henry}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (46,93 \times 10^{-6}) = 0,01473469 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,01473469}{30} = 0,0003274376 \, \Omega$$

• **Filter HF6**

Peredaman IHD pada orde lima dan tujuh menggunakan filter single tuned tidak bisa meredam nilai THD dan hasil peredaman THD di bus PTB3 masih tinggi yaitu 5,99%. Untuk itu perlu peredaman IHD di orde lain yang memiliki nilai signifikan dalam penyumbang nilai THD sehingga nilainya dapat dikurangi. Pada filter HF6 dipakai untuk peredaman IHD pada orde ke-11 menggunakan filter high pass damped. Dari simulasi load flow daya reaktif dan daya aktif di ETAP didapat nilai beban reaktif di bus PTB3 adalah 178 kVar. Untuk high pass damped orde ke-11 cukup menggunakan 178 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{178 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{178000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 3,925 \times 10^{-3} F = 3925,75 \, \mu F$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah high pass damped pada orde ke-11. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $11 \times 50 \text{ Hz} = 550 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_1 = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 550)^2 \times 3,925 \times 10^{-3} F} = 21,35 \times 10^{-6} \text{ Henry}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (21,35 \times 10^{-6}) = 0,00670443 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter high pass damped dipilih dengan nilai 20. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{2}{\omega \cdot C} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f_{(harm)} \cdot C}$$

$$R = \frac{2}{2 \times 3,14 \times 550 \times 14,877 \times 10^{-3}} = 0,1474974644 \Omega$$

c Perhitungan spesifikasi filter pada Bus POL

Perencanaan filter R, C, dan L atau filter pasif pada bus POL adalah filter single tuned pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 terdapat IHD yang tinggi sehingga diharapkan pemasangan pada orde ke-5 THD pada bus POL dapat berkurang. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada power faktor beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,85 ke 1. Juga memperhitungkan besaran beban penghasil harmonisa. Berikut perhitungan filter single tuned orde ke lima pada bus POL milik Pertamina.

- **Filter HF3**

Dari simulasi load flow daya reaktif dan daya aktif di ETAP didapat nilai beban reaktif di bus POL adalah 415,12 kVar. Sehingga nilai kapasitor pada filter penurun harmonisa nya adalah:

Total daya reaktif 3 fasa:

$$\Delta Q = S(\sin(\cos^{-1}f)) = 788 \text{ kVA}(\sin(\cos^{-1}0,85))$$

$$\Delta Q = 788(\sin 31,79) = 415,12 \text{ kVar}$$

Karena pada bus POL terdapat dua filter untuk menurunkan nilai %THD yaitu:

HF10 = Single Tuned orde ke-5

HF3 = Single Tuned orde ke-7

Sehingga nilai setting Q pada masing-masing filter adalah

$$\text{HF10} + \text{HF3} = 415 \text{ kVar}$$

$$207 \text{ kVar} + 208 \text{ kVar} = 415 \text{ kVar}$$

Untuk single tuned orde ke lima cukup menggunakan 207 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{207 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{207000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 4,56534 \times 10^{-3} \text{ F} = 4565,34 \text{ uF}$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-5. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_c = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 4,56534 \times 10^{-3}} = 88,86 \times 10^{-6} \text{ Farad}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (88,86 \times 10^{-3}) = 0,02790338 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,02790338}{30} = 0,0009301127 \Omega$$

• Filter HF10

Untuk single tuned orde ke tujuh cukup menggunakan 208 kVar sehingga nilai kapasitor (C) yang terpasang pada 0,38 kV dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, adalah

$$\Delta Q = \frac{V_{LL}^2}{X_c} = V_{LL}^2 \cdot \omega_0 \cdot C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{V_{LL}^2 \cdot \omega_0} = \frac{208 \times 10^3}{(2\pi \times 50) \times 380^2}$$

$$C = \frac{208000}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 144400} = 4,5874 \times 10^{-3} F = 4587,4 \mu F$$

Nilai induktor (L):

Fokus perancangan filter adalah single tuned pada orde ke-5. Sehingga setelah frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 350)^2 \times 4,5874 \times 10^{-3}} = 45,12 \times 10^{-6} \text{ Farad}$$

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (45,12 \times 10^{-6}) = 0,01416797 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter single tuned dipilih antara 30 dan 60. Dalam perancangan filter ini nilai Q dipilih 30. Sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,01416797}{30} = 0,0004722658 \Omega$$

d Nilai-nilai yang didapat dari perhitungan

Dari beberapa perhitungan 4.3.a sampai 4.3.c dapat dikumpulkan data-data hasil perhitungan, dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3. untuk memasukkan setting filter ke tools VSD/UPS dapat double click tool yang akan di setting dan pilih tab harmonic. Tampilan setting harmonic pada VSD dan UPS dapat dilihat pada gambar 4.7 untuk setting harmonic di VSD dan gambar 4.6 untuk setting harmonic pada UPS.

Table 4.2 Setting filter di HF3, PTB 5th, dan HF4

Keterangan	HF10	HF3	PTB 5th
Filter Quality Factor (Q)	30	30	30
Orde (th)	5	7	5
Frek (Hz)	250	50	350

V (Volt)	380	380	380
Kvar	207	208	300
C (F & uF)	0,00456534	0,00458740	0,00661644
	4565,34	4587,40	6616,44
L (H & uH)	0,00008886	0,00004512	0,00006132
	88,86	45,12	61,32
Xl (ohm)	0,02790338	0,0141679	0,01925333
R (ohm)	0,00093011	0,000472265	0,000641777
Filter	Single Tone	Single Tone	Single Tone

Table 4.3 Setting filter di HF6, 5th, dan PTB 7th

Keterangan	HF4	HF6	5th
Filter Quality Factor (Q)	30	20	30
Orde (th)	7	11	5
Frek (Hz)	350	550	250
V (Volt)	380	380	380
Kvar	200	178	378
C (F & uF)	0,00441096	0,00392575	0,0083367
	4410,96	3925,75	8336,72
L (H & uH)	0,00004693	0,00021358	0,0000486
	46,93	21,35	48,66
Xl (ohm)	0,01473469	0,00670443	0,0152804
R (ohm)	0,00032743	0,147497446	0,0005093
Filter	Single Tone	High Pass Damped	Single Tone

4. 4. Hasil Pemasangan filter

Pemasangan filter pada tiga sumber harmonisa dominan pada bus POL, bus PTB3, dan bus PTB menunjukkan hasil penurunan nilai harmonisa tegangan yang sebelumnya diatas standart toleransi yang diperbolehkan yaitu tidak boleh melebihi 5% menjadi dibawah standart. Penurunan nilai harmonisa dapat dilihat pada tabel 4.4

Table 4.4 Penurunan nilai harmonisa setelah pemasangan filter

No	Nama Bus	% THD	
		Sebelum dipasang filter	Sesudah dipasang filter
1	Bus 1 MPH13	5,82	0,59
2	Bus 2 MPH13	5,82	0,59
3	Bus 3 MPH13	5,82	0,59
4	BUS A1	5,31	0,37
5	BUS A2	4,79	0,28
6	BUS AP-1	5,82	0,59
7	BUS AP-II	5,25	0,36
8	Bus AP1	5,82	0,59
9	Bus API	5,31	0,59
10	BUS CARGO	13,74	0,72
11	BUS MPH	5,74	0,59
12	BUS MPH 11	5,82	0,59
13	BUS MPH-M02	18,18	2,03
14	Bus MPH-M12	5,82	0,59
15	BUS PTB	34,84	4,64
16	BUS PTB3	11,90	4,93
17	BUS RA	5,45	0,4
18	BUS RA-1	5,45	0,4
19	BUS RB	5,48	0,41
20	Bus RB-RC	5,82	0,59
21	BUS RC	5,27	0,36

22	BUS RC-RB	5,82	0,59
23	Bus SD1	4,78	0,29
24	Bus SD2	5,24	0,36
25	Bus SD3	5,28	0,37
26	BUS T02-RB	5,27	0,41
27	BUS WS	16,38	1,12
28	BUS-RB	5,48	0,41
29	Bus4 MPH13	5,82	0,59
30	BUS POL	8,22	2,23

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jen-Hao Teng, and Chuo-Yean Chang, "Backward/Forward Sweep Based Harmonic Analysis Method for Distribution System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.22, No. 3, 2007.
- [2] William H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", CRC Press LLC, 2002.
- [3] Arrillaga J, Watson N.R, "Power System Harmonics" John Wiley and Sons, Ltd, 2003.
- [4] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, May. 1995.
- [5] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power network part I: Concepts, models and simulation techniques," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 1, pp. 452-465, Jan. 1996.
- [6] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power network part II: Sample system and examples," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 1, pp. 466-474, Jan. 1996.

BIODATA PENULIS



M. Aris Maulana Rifa'i dilahirkan di kota Nganjuk pada 1988. Penulis merupakan anak pertama dari lima bersaudara. Seseorang yang memiliki hobi pemrograman dan mempunyai hobi bermain sepak bola. Penulis ini menempuh jenjang awal pendidikan di SDN Soniageng IV, dilanjutkan ke SMPN 1 Prambon lalu ke SMAN 1 Tanjunganom, menempuh pendidikan D3 di ITS Surabaya jurusan elektro komputer kontrol tahun 2008 lalu melanjutkan ke Program Lintas Jalur S1 Teknik Elektro ITS dan mengambil bidang studi sistem tenaga.

Selama kuliah, penulis aktif mengikuti pelatihan-pelatihan yang diadakan di jurusan teknik elektro. Pelatihan yang diikuti oleh penulis adalah Pelatihan ETAP Tingkat Dasar.